



Universidade de Aveiro
2010

Departamento de Engenharia Mecânica

HERLANDER **ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS**
MIGUEL FRANCISCO **ESTRUTURAS ESTEREOLITOGRAFICAS**



HERLANDER
MIGUEL FRANCISCO **ESTUDO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DAS**
ESTRUTURAS ESTEREOLITOGRÁFICAS

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação científica do Doutor Paulo Jorge da Silva Bártolo, Professor Coordenador do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Politécnico de Leiria e co-orientação científica do Doutor José António de Oliveira Simões, Professor Associado com Agregação do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Aveiro

Aos meus pais, Ângelo e Irene, e à minha irmã Ângela.

o júri

presidente

Prof. Doutor Francisco José Malheiro Queirós de Melo
professor associado da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor José António de Oliveira Simões
professor associado com agregação da Universidade de Aveiro

Prof. Doutor António José Vilela Pontes
professor auxiliar da Escola de Engenharia da Universidade do Minho

Prof. Doutor Paulo Jorge da Silva Bártolo
professor coordenador da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria

agradecimentos

A realização deste trabalho contou directa e indirectamente com a colaboração de algumas pessoas e entidades, para as quais expresso a minha sincera gratidão.

Ao Professor Doutor Paulo Jorge da Silva Bártolo, orientador científico, pela disponibilidade, estímulo, confiança, permanente incentivo e, fundamentalmente, pela amizade demonstrada ao longo da orientação científica deste trabalho.

Ao Professor Doutor José António de Oliveira Simões, co-orientador científico, pela importante contribuição, disponibilidade e amizade prestada ao longo de todo o trabalho.

Ao Professor Doutor Carlos Alexandre Bento Capela, por as permanentes palavras de apoio e incentivo ao longo da realização deste trabalho.

Ao Professor Doutor Artur Jorge dos Santos Mateus, por toda a disponibilidade demonstrada na execução dos provetes.

À Professora Doutora Ausenda Luís Avelar Mendes, por toda a disponibilidade demonstrada no esclarecimento de dúvidas relacionadas com materiais poliméricos.

Ao Carlos Dias, do laboratório do Departamento de Eng.^a Mecânica da ESTG, por o valioso apoio prestado na execução dos testes DMA.

Aos meus pais, irmã e restante família, pelo importante e constante apoio, encorajamento, carinho e colaboração dado durante a realização deste trabalho.

A todos, o meu sincero obrigado.

palavras-chave

Estereolitografia, DMA, Fabricação aditiva, Sistemas poliméricos.

resumo

A estereolitografia é uma das mais importantes tecnologias de fabricação aditiva, sendo objecto de significativo interesse por parte da comunidade internacional. Este trabalho visa o estudo da influência sobre as propriedades termo-mecânicas dos diversos parâmetros de fabricação (distância de varrimento, profundidade de cura, existência ou não de pós-cura e posição de construção) e da humidade. Para tal foram produzidos vários provetes utilizando um sistema de estereolitografia comercial e utilizado um sistema de análise mecânica dinâmica para caracterização dos provetes. Os resultados obtidos, permitem a definição de algumas condições operatórias optimizadas destinadas a produção de modelos estereolitográficos de boas propriedades mecânicas.

keywords

Stereolithography, DMA, Additive fabrication, Polymeric systems.

abstract

Stereolithography is one of the most relevant additive technologies commercially available, being intensively studied by the international research community. This research study aims at developing a proper knowledge on the influence of the fabrication parameters (hatch spacing, penetration depth, post-cure operations) and moisture exposure on the thermo-mechanical properties of stereolithographic parts. Therefore, several testing specimens were produced using a commercial available stereolithographic system and a Dynamical Analyse System was used to characterize them. The obtained results enable us to define some optimized fabrication conditions in order to produce parts with good mechanical properties.

ÍNDICE

1-INTRODUÇÃO	1
1.1-Objectivos e estrutura da tese.....	1
2-Fabricação aditiva	3
2.1 – Introdução.....	3
2.2 – Processos aditivos.....	6
2.2.1– <i>Classificação</i>	6
2.2.2– <i>Principais etapas em fabricação aditiva</i>	9
2.2.2.1– <i>Geração do Modelo CAD</i>	9
2.2.2.2– <i>Modelo em formato STL</i>	9
2.2.2.4 – <i>Fatiamento do modelo (SLI)</i>	11
2.2.2.5 – <i>Pré-Processamento</i>	13
2.2.2.5.1 – <i>Orientação da peça</i>	13
2.2.2.5.2 – <i>Geração de suportes estruturais</i>	14
2.2.2.5.3 – <i>Efeito de escada</i>	14
2.2.3– <i>Processos estereolitográficos</i>	16
2.2.3.1.1– <i>Estereolitografia convencional (radiação ultra-violeta)</i>	17
2.2.3.1.2– <i>Estereolitografia de CO₂</i>	22
2.2.3.1.3– <i>Estereo-termo-litografia</i>	23
2.2.3.1.4– <i>Processos de irradiação por mascara</i>	25
2.2.3.1.5– <i>Micro Estereolitografia</i>	28
3 – MATERIAIS E TÉCNICAS.....	31
3.1 – Materiais	31
3.1.1 – <i>Material utilizado</i>	31
3.1.2 – <i>Fotopolimerização</i>	31
3.1.2.1 – <i>Foto-polimerização por radicais livres</i>	33
3.1.2.2 – <i>Foto-polimerização cationica</i>	36
3.2 – Técnicas	37
3.2.1 – <i>Sistema de estereolitografia</i>	37
3.2.2 – <i>Análise mecânica-dinâmica (DMA)</i>	37

3.2.2.1 – Equipamento DMA	37
3.2.2.2 – Princípios teóricos.....	39
3.2.2.2.1 – Ensaio dinâmico-mecânico	43
3.2.2.5 – Temperaturas de transição.....	47
3.2.2.4 – Variação do módulo útil e $\tan \delta$ para os diversos tipos de materiais poliméricos	50
4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS	52
4.1 – Introdução	52
4.2 – Procedimento dos ensaios de humidade	55
4.3 – Resultados experimentais	55
4.3.1 – Caso I: Efeito da posição de construção na plataforma.....	57
4.3.1.1 – Propriedades mecânicas	57
4.3.1.1.1 – Posição Horizontal.....	57
4.3.1.1.1.1 – Resultados.....	57
4.3.1.1.1.2 – Comparação de resultados.....	62
4.3.1.1.2 – Posição Vertical	64
4.3.1.1.2.1 – Resultados.....	64
4.3.1.1.2.2 – Comparação de resultados.....	68
4.3.1.2 – Temperatura de transição vítrea.....	69
4.3.2 – Caso II: Efeito da variação do espaçamento entre linhas de varrimento.....	70
4.3.2.1 – Propriedades mecânicas	70
4.3.2.1.1 – Posição Horizontal.....	70
4.3.2.1.1.1 – Resultados.....	70
4.3.2.1.1.2 – Comparação de resultados.....	78
4.3.2.1.2 – Posição Vertical	79
4.3.2.1.2.1 – Resultados.....	79
4.3.2.1.2.2 – Comparação de resultados.....	87
4.3.2.2 – Temperatura de transição vítrea.....	88
4.3.3.1 – Propriedades mecânicas	89
4.3.3.2 – Temperatura de transição vítrea.....	99
. 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	101
5.1- Conclusões	101
5.2- Trabalhos futuros	105

REFERÊNCIAS	106
--------------------------	------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2. 1 – Fabricação aditiva no desenvolvimento de produto	5
Figura 2. 2 -Processo convencional versus processo com introdução das tecnologias de fabricação aditiva no desenvolvimento de produto	5
Figura 2. 3 -Métodos para a obtenção de protótipos e peças manufacturadas	6
Figura 2. 4 - a) Classificação dos processos de fabricação aditiva de acordo com o tipo de material a utilizar; b) Classificação simplificada	7
Figura 2. 5 - Fases do processo de prototipagem rápida	8
Figura 2. 6 - Fases do processo de prototipagem rápida	8
Figura 2. 7 - Estrutura de um ficheiro STL em ASCII	10
Figura 2. 8 - Representação da normal e da numeração dos vértices de cada triângulo	10
Figura 2. 9 - Estrutura de um ficheiro STL-binário	11
Figura 2. 10 - Comparação dos desvios associados à espessura de camada	12
Figura 2. 11 - Peças (a) e (b) obtidas com diferentes orientações	14
Figura 2. 12 - Efeito escada na definição de uma superfície inclinada 45°	15
Figura 2. 13 - Efeito de escada em função do ângulo de inclinação da superfície e espessura da camada	15
Figura 2. 14 - Processos estereolitográficos. a) Irradiação por máscara. b) Irradiação directa (Bártolo, 2001)	17
Figura 2. 15 - Processo de estereolitografia patenteado por Hull	18
Figura 2. 16 - Efeito do grau de sobreposição entre linhas de varrimento	19
Figura 2. 17 - Sistema de construção descendente	20
Figura 2. 18 - Perfil da linha de varrimento	21
Figura 2. 19 - Sistema de estereolitografia de CO ₂ e alguns componentes produzidos	23
Figura 2. 20 - Sistema de estéreo-termo-litografia multimaterial	25
Figura 2. 21 - Representação esquemática das várias etapas do processo SGC	27
Figura 2. 22 - Sistema de micro-estereolitografia integral em desenvolvimento no Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado de Produto do Instituto Politécnico de Leiria	29
Figura 2. 23 - a) Sistema DMD, b) Sistema de fixação do DMD no equipamento de micro-estereolitografia.....	30
 Figura 3. 1 - Representação simplificada da foto-polimerização por radicais livres	 34
Figura 3. 2 - Equipamento DMA Tritec 2000	38
Figura 3. 3 - Viscoelasticidade linear em ensaios de fluência.....	40

Figura 3. 4 - Viscoelasticidade linear em ensaios de relaxação de tensões	42
Figura 3. 5 - Material viscoelástico submetido a um ensaio dinâmico-mecânico em diferentes modos.	43
Figura 3. 6 - Tensão sinusoidal e correspondente deformação para um material viscoelástico linear	44
Figura 3. 7 - Variação sinusoidal da tensão e da deformação numa experiência mecânica dinâmica	45
Figura 3. 8 - Diagrama de Argand ilustrando a relação entre E^* , E' e E''	47
Figura 3. 9 - Transições térmicas num material polimérico	48
Figura 3. 10 - Variação do módulo útil em função da temperatura para polímeros amorfos, semi-cristalinos e com ligações cruzadas	50
 Figura 4. 1 - Numeração para identificação dos provetes	53
Figura 4. 2 - Caso A211: Influência da posição de construção na plataforma nos provetes 4A e 7A ($R_{7A} > R_{4A}$).....	58
Figura 4. 3 - Deflexão do feixe luminoso.....	59
Figura 4. 4 - Caso A231: Influência da posição de construção na plataforma nos provetes 6A e 9A ($R_{9A} > R_{6A}$).....	60
Figura 4. 5 - Caso A222: Influência da posição de construção na plataforma nos provetes 5B e 8B ($R_{8B} >>> R_{5B}$).....	62
Figura 4. 6 - Caso B211: Influência da posição de construção na plataforma nos provetes 4C e 7C ($R_{7C} > R_{4C}$).....	65
Figura 4. 7 - Caso B231: Influência da posição de construção na plataforma nos provetes 6C e 9C ($R_{9C} > R_{6C}$).....	66
Figura 4. 8 - Caso B221: Influência da posição de construção na plataforma nos provetes 5C e 8C ($R_{8C} >>> R_{5C}$).....	67
Figura 4. 9 - Caso A111 (1A) versus Caso A211 (7A): Influência da distância de varrimento nos provetes 1A (distância de varrimento 0.025 mm) e 7A (distância de varrimento 0.15 mm)	71
Figura 4. 10 - Resultados obtidos para os provetes 1A e 7A	72
Figura 4. 11 - Caso A131 (3A) versus Caso A231 (9A): Influência da distância de varrimento nos provetes 3A (distância de varrimento 0.025 mm) e 9A (distância de varrimento 0.15 mm)	73
Figura 4. 12 - Caso A132 (3B) versus A232 (9B): Influência da distância de varrimento nos provetes 3B (distância de varrimento 0.025 mm) e 9B (distância de varrimento 0.15 mm).....	74
Figura 4. 13 - Caso A121 (2A) versus Caso A221 (8A): Influência da distância de varrimento nos provetes 2A (distância de varrimento 0.025 mm) e 8A (distância de varrimento 0.15 mm)	76

Figura 4. 14 - Caso A122 (2B) versus Caso A222 (8B): Influência da distância de varrimento nos provetes 2B (distância de varrimento 0.025 mm) e 8B (distância de varrimento 0.15 mm)	77
Figura 4. 15 - Caso B111 (1C) versus Caso B211 (7C): Influência da distância de varrimento nos provetes 1C (distância de varrimento 0.025 mm) e 7C (distância de varrimento 0.15 mm)	80
Figura 4. 16 - Caso B112 (1D) versus Caso B212 (7D): Influência da distância de varrimento nos provetes 1D (distância de varrimento 0.025 mm) e 7D (distância de varrimento 0.15 mm)	81
Figura 4. 17 - Caso B131 (3C) versus Caso B231 (9C): Influência da distância de varrimento nos provetes 3C (distância de varrimento 0.025 mm) e 9C (distância de varrimento 0.15 mm)	83
Figura 4. 18 - Caso B132 (3D) versus Caso B232 (9D): Influência da distância de varrimento nos provetes 3D (distância de varrimento 0.025 mm) e 9D (distância de varrimento 0.15 mm)	84
Figura 4. 19 - Caso B121 (2C) versus Caso B221 (8C): Influência da distância de varrimento nos provetes 2C (distância de varrimento 0.025 mm) e 8C (distância de varrimento 0.15 mm)	85
Figura 4. 20 - Caso B122 (2D) versus Caso B222 (8D): Influência da distância de varrimento nos provetes 2D (distância de varrimento 0.025 mm) e 8D (distância de varrimento 0.15 mm)	86
Figura 4. 21 - Influência da exposição à humidade (provetes 1A) executado na posição horizontal, com distância de varrimento 0.025 mm, profundidade de cura 0.1 e submetido a operação de pós-cura.....	90
Figura 4. 22 - Influência da exposição à humidade (provetes 1B) executado na posição horizontal, com distância de varrimento 0.025 mm, profundidade de cura 0.1 mm e não submetido a operação de pós-cura	94
Figura 4. 23 - Influência da exposição à humidade (provetes 1C) executado na posição vertical, com distância de varrimento 0.025 mm, profundidade de cura 0.1 mm e submetido a operação de pós-cura	97
Figura 4. 24 - Variação de Tg em provete submetido a exposição à humidade (provetes 1A)	99

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Resumo histórico de alguns desenvolvimentos tecnológicos, que permitiram o desenvolvimento das técnicas aditivas.....	4
Tabela 3. 1 - Principais características da resina Accura 45HC plastic	32
Tabela 3. 2 - Vantagens e desvantagens dos mecanismos de polimerização catiónicos e por radicais livres	33
Tabela 3. 3 - Características do equipamento estereolitográfico SLA250	37
Tabela 3. 4 - Características do equipamento DMA Tritec 2000	39
Tabela 4. 1 - Matriz com a identificação das diferentes variáveis a que cada provete foi submetido	53
Tabela 4. 2 - Matriz com as dimensões de cada provete	54
Tabela 4. 3 - Caso A211: Resultados obtidos para os provetes 4A e 7A ($R_{7A} > R_{4A}$)	58
Tabela 4. 4 - Caso A231: Resultados obtidos para os provetes 6A e 9A ($R_{9A} > R_{6A}$)	61
Tabela 4. 5 - Caso A222: Resultados obtidos para os provetes 5B e 8B ($R_{8B} >>> R_{5B}$)	62
Tabela 4. 6 - Resultados globais obtidos para o módulo útil à temperatura ambiente	63
Tabela 4. 7 - Resultados globais obtidos para o módulo perdido à temperatura ambiente	63
Tabela 4. 8 - Resultados globais obtidos para o módulo perdido à temperatura de transição vítrea.....	64
Tabela 4. 9 - Resultados globais obtidos para tan delta à temperatura do pico de tan delta	64
Tabela 4. 10 - Caso B211: Resultados obtidos para os provetes 4C e 7C ($R_{7C} > R_{4C}$)	65
Tabela 4. 11 - Caso B231: Resultados obtidos para os provetes 6C e 9C ($R_{9C} > R_{6C}$)	66
Tabela 4. 12 - Caso B221: Resultados obtidos para os provetes 5C e 8C ($R_{8C} >>> R_{5C}$).....	68
Tabela 4. 13 - Resultados globais obtidos para o módulo útil à temperatura ambiente	68
Tabela 4. 14 - Resultados globais obtidos para o módulo perdido à temperatura ambiente	69
Tabela 4. 15 - Resultados globais obtidos para o módulo perdido à temperatura de transição vítrea.....	69
Tabela 4. 16 - Resultados globais obtidos para tan delta à temperatura do pico de tan delta	69
Tabela 4. 17 - Variação da temperatura de transição vítrea, função da posição de construção na plataforma em provetes construídos na posição horizontal.....	70
Tabela 4. 18 - Variação da temperatura de transição vítrea, função da posição de construção na plataforma em provetes construídos na posição vertical.....	70

Tabela 4. 19 - Resultados obtidos para os provetes 1A e 7A.....	72
Tabela 4. 20 - Resultados obtidos para os provetes 1B e 7B	73
Tabela 4. 21 - Resultados obtidos para os provetes 3A e 9A.....	74
Tabela 4. 22 - Resultados obtidos para os provetes 3B e 9B	75
Tabela 4. 23 - Resultados obtidos para os provetes 2A e 8A.....	76
Tabela 4. 24 - Resultados obtidos para os provetes 2B e 8B	77
Tabela 4. 25 - Resultados globais obtidos para o módulo útil à temperatura ambiente	78
Tabela 4. 26 - Resultados globais obtidos para o módulo perdido à temperatura ambiente	78
Tabela 4. 27 - Resultados globais obtidos para o módulo perdido à temperatura de transição vítrea.....	79
Tabela 4. 28 - Resultados globais obtidos para tan delta à temperatura do pico de tan delta	79
Tabela 4. 29 - Resultados obtidos para os provetes 1C e 7C	80
Tabela 4. 30 - Resultados obtidos para os provetes 1D e 7D.....	82
Tabela 4. 31 - Resultados obtidos para os provetes 3C e 9C	83
Tabela 4. 32 - Resultados obtidos para os provetes 3D e 9D.....	84
Tabela 4. 33 - Resultados obtidos para os provetes 2C e 8C	85
Tabela 4. 34 - Resultados obtidos para os provetes 2D e 8D.....	87
Tabela 4. 35 - Resultados globais obtidos para o módulo útil à temperatura ambiente	87
Tabela 4. 36 - Resultados globais obtidos para o módulo perdido à temperatura ambiente	87
Tabela 4. 37 - Resultados globais obtidos para o módulo perdido à temperatura de transição vítrea.....	88
Tabela 4. 38 - Resultados globais obtidos para tan delta à temperatura do pico de tan delta	88
Tabela 4. 39 - Variação da temperatura de transição vítrea, função da distância entre linhas de varrimento em provetes construídos na posição horizontal	89
Tabela 4. 40 - Variação da temperatura de transição vítrea, função da distância entre linhas de varrimento em provetes construídos na posição vertical.....	89
Tabela 4. 41 - Resultados obtidos com o provete 1A nos testes de exposição à humidade	91
Tabela 4. 42 - Variação do módulo útil à temperatura ambiente, função do tempo de exposição à humidade (proвете 1A).....	91
Tabela 4. 43 - Variação do módulo perdido à temperatura ambiente, função do tempo de exposição à humidade (proвете 1A).....	91
Tabela 4. 44 - Variação do módulo perdido à temperatura de transição vítrea, função do tempo de exposição à humidade (proвете 1A).....	92
Tabela 4. 45 - Variação de tan delta à temperatura do pico de tan delta, função do tempo de exposição à humidade (proвете 1A).....	92
Tabela 4. 46- Resultados obtidos com o provete 1B nos testes de exposição à humidade	94

Tabela 4. 47 - Variação do módulo útil à temperatura ambiente, função do tempo de exposição à humidade (provete 1B).....	95
Tabela 4. 48 - Variação do módulo perdido à temperatura ambiente, função do tempo de exposição à humidade (provete 1B)	95
Tabela 4. 49 - Variação do módulo perdido à temperatura de transição vítrea, função do tempo de exposição à humidade (provete 1B)	95
Tabela 4. 50 - Variação de tan delta à temperatura do pico de tan delta, função do tempo de exposição à humidade (provete 1B)	96
Tabela 4. 51 - Resultados obtidos com o provete 1C nos testes de exposição à humidade	97
Tabela 4. 52 - Variação do módulo útil à temperatura ambiente, função do tempo de exposição à humidade (provete 1C).....	98
Tabela 4. 53 - Variação do módulo perdido à temperatura ambiente, função do tempo de exposição à humidade (provete 1C)	98
Tabela 4. 54 - Variação do módulo perdido à temperatura de transição vítrea, função do tempo de exposição à humidade (provete 1C)	98
Tabela 4. 55 - Variação de tan delta à temperatura do pico de tan delta, função do tempo de exposição à humidade (provete 1C)	99
Tabela 4. 56 - Variação de Tg com a exposição à humidade (provete 1A)	99
Tabela 4. 57 - Variação de Tg com a exposição à humidade	100

SIMBOLOGIA E SIGLAS

2D: Duas Dimensões (*2-Dimensional*)

3D: Três Dimensões (*3-Dimensional*)

3DP: Impressão Tridimensional (*3-Dimensional Printing*)

ACES: (*Accurate Clear Epoxy Solid*)

ANSY: (*American National Standards Institute*)

ASCII: Código Americano Standard para Intercâmbio de Informação (*American National Standards Institute*)

ASTM: (*American Society for Testing and Materials*)

CAD: Desenho Assistido por Computador (*Computer-Aided Design*)

CAM: Fabricação Assistida por Computador (*Computer-Aided Manufacturing*)

CFL: (*Cubital Facet List*)

CGS: (*Constructive Solid Geometry*)

CLI: (*Common Layer Interface*)

CNC: Controlo Numérico Computorizado (*Computer Numerical Control*)

CT: Tomografia Computorizada (*Computerized Tomography*)

CTE: Coeficiente de Expansão Térmica (*Thermal Expansion Coefficient*)

DMA: Análise Dinâmico-Mecânica (*Dynamic Mechanical Analysis*)

DSC: (*Differential Scanning Calorimetry*)

EB: Feixe de electrões (*Electron Beam*)

EDM: Electroerosão (por penetração ou por fio) (*Electrical Discharge Machining*)

FDM: Modelação por Fusão e Deposição (*Fused Deposition Modeling*)

HDT: Temperatura de Deflexão por aquecimento (*Heat Deflection Temperature*)

HPGL: *Hewlette-Packard Graphics Language*

IGES: *Initial Graphics Exchange Specification*

IJP: Impressão a Jacto de Tinta (*Ink Jet Printing*)

ISO: Organização Internacional de Normalização (*International Organization for Standardization*)

LCD: (*Liquid Crystal Display*)

LEAF: (*Layer Exchange ASCII Format*)

LOM: Construção de Objectos por Camadas (*Laminated Object Manufacturing*)

NC: Controlo Numérico (*Numerical Control*)

PLT: (*Paper Lamination Prototyping*)

RGB: Vermelho, Verde, Azul (*Red, Green, Blue*)

RMPD: (*Rapid Micro Product Development*)

RP: Prototipagem Rápida (*Rapid Prototyping*)

RPI: *Rensselaer Polytechnic Institute*

RT: (*Rapid Tooling*)

SL: Estereolitografia (*Stereolithography*)

SLA: Equipamento de Estereolitografia (*Stereolithography Apparatus*)

SLC: (*Stereolithography Contour*)

SLI: Fatiamento (*Slicing*)

SLS: Sinterização Selectiva por Laser (*Selective Laser Sintering*)

STGL: Estereo-Termo-Litografia (*Stereo-Thermal-LithoGraphy*)

STH: *Surface Triangle Hinted*

STL: Ficheiro Formato Estereolitográfico (*Stereolithography File Format*)

T_g: Temperatura de transição vítrea (*Glass Transition Temperature*)

T_m: Temperatura de Fusão

UV: Radiação Ultravioleta

1-INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas assistiu-se a uma profunda alteração na forma como os produtos são concebidos e desenvolvidos. O desenvolvimento tecnológico de países emergentes aliada a elevada qualificação dos seus profissionais e baixo custo da mão-de-obra, fizeram com que se tenha assistido a uma gradual deslocação dos centros produtivos para o Leste Europeu e para a Ásia. Este facto, que se agudizou nos últimos anos levou os países do espaço Europeu a proporem um conjunto de iniciativas visando a “re-industrialização” da Europa.

De acordo com a Rapid Manufacturing Platform (Rapid Manufacturing Platform, 2006) o processo de “re-industrialização” do espaço Europeu passa por uma aposta em tecnologias baseadas no conhecimento e eco-sustentáveis, destinadas à produção de produtos personalizados de elevado valor acrescentado. De acordo com o mesmo grupo, as tecnologias aditivas de fabricação assumem neste processo um papel de destaque. Entre estas tecnologias, os processos estereolitográficos foram os primeiros a serem propostos sendo também dos mais utilizados (Wohlers, 2010). Contudo, os processos estereolitográficos, como alias a generalidade dos processos de fabricação aditiva, estão ainda numa fase de desenvolvimento (longe do seu nível de maturação), requerendo optimização de processos, materiais e processos de construção de modo a obterem-se produtos de melhor qualidade, possuindo adequadas propriedades mecânicas.

1.1-Objectivos e estrutura da tese

De acordo com o exposto anteriormente, os principais objectivos desta dissertação são:

- Efectuar um levantamento das tecnologias de fabricação aditiva com especial destaque para os processos de estereolitográficos;
- Efectuar um detalhado sobre os fundamentos teóricos de ensaios dinâmico-mecânicos para caracterização de estruturas poliméricas;
- Realização de análises dinâmico-mecânicas com provetes estereolitográficos de modo a avaliar-se o efeito da posição de cura do provete na plataforma de

construção, do espaçamento entre linhas de varrimento e do efeito da humidade em termos das propriedades mecânicas e da variação da temperatura de transição vítrea.

De acordo com os objectivos anteriormente definidos, a presente dissertação foi estruturada em 5 capítulos que descrevem de forma detalhada o trabalho teórico e experimental desenvolvido. O primeiro capítulo introduz o tema de dissertação e apresenta os principais objectivos deste trabalho.

Capítulo 2: Fabricação aditiva

Neste capítulo introduzem-se os processos de fabricação aditiva. É apresentada uma classificação dos processos e descritas as principais fases associadas à produção de modelos. São também indicados os principais formatos utilizados para troca de informação entre sistemas de fabricação aditiva e descrevem-se de forma detalhada os processos estereolitográficos.

Capítulo 3: Materiais e técnicas

Este capítulo apresenta o material utilizado neste trabalho de investigação e os princípios teóricos dos ensaios dinâmico-mecânicos utilizados para caracterizar provetes estereolitográficos.

Capítulo 4: Resultados experimentais

O capítulo 4 apresenta os resultados obtidos com os provetes estereolitográficos, avaliando-se o efeito da posição de cura do provete na plataforma de construção, do espaçamento entre linhas de varrimento e do efeito da humidade em termos das propriedades mecânicas e da variação da temperatura de transição vítrea.

Capítulo 5: Conclusões e trabalhos futuros

Apresentam-se neste capítulo as principais conclusões decorrentes do trabalho de investigação desenvolvido e apontam-se linhas para desenvolvimentos futuros baseadas no conhecimento adquirido e nos resultados do trabalho experimental realizado.

2-Fabricação aditiva

2.1 – Introdução

No competitivo mercado actual o sucesso das empresas passa pela utilização de metodologias e tecnologias avançadas de apoio ao ciclo de desenvolvimento do produto que lhes permita:

1. um aumento da qualidade dos produtos;
2. uma redução do tempo de desenvolvimento e lançamento de novos produtos no mercado;
3. uma redução de custos.

Neste cenário as mais modernas e competitivas empresas devem procurar utilizar de forma mais eficiente as avançadas ferramentas tecnológicas existentes procurando igualmente direccionar as suas políticas e estratégias para “nichos” de mercado cada vez mais específicos e para a prestação de serviços mais integrados (Bártolo, 2001). Esta integração exige o envolvimento de um cada vez maior número de agentes no ciclo de desenvolvimento do produto, o que embora podendo traduzir-se num aumento de complexidade na medida em que estes agentes possuem formações, linguagens e percepções do produto bastante diferentes, originará um aumento de possibilidades em termos do espaço inicial de concepção do produto, um aumento da qualidade, uma redução de erros e custos associados ao desenvolvimento de produto, possibilitando à empresa uma maior flexibilidade e capacidade de inovação (Ulrich, Eppinger, 2007).

É actualmente consensual que a existência de um protótipo físico numa fase inicial do processo de desenvolvimento do produto constitui uma ferramenta fundamental na gestão das complexas tarefas associadas ao processo de desenvolvimento e na gestão dos diferentes agentes intervenientes neste processo.

O grande desenvolvimento verificado ao nível dos computadores e a sua grande disseminação, em especial dos computadores pessoais e minicomputadores, vieram trazer mudanças significativas na maneira de trabalhar da indústria, permitindo grandes avanços em áreas como o desenho assistido por computador (CAD, *computer-aided*

design), a fabricação assistida por computador (CAM, *computer-aided manufacturing*), e o controlo numérico computadorizado (CNC, *computer numerical control*). O surgimento dos sistemas de fabricação aditiva foi também possível graças ao desenvolvimento das tecnologias assistidas por computador. Na Tabela 2.1 apresentam-se alguns dos principais desenvolvimentos históricos das várias tecnologias assistidas por computador (Kai e Fai, 1998).

Tabela 2. 1 - Resumo histórico de alguns desenvolvimentos tecnológicos, que permitiram o desenvolvimento das técnicas aditivas (Kai e Fai, 1998)

Ano de introdução	Tecnologia
1770	Mecanização
1946	Primeiro computador
1952	Primeiro maquina com controlo numérico (NC, <i>numerical control</i>)
1960	Primeiro laser comercial
1961	Primeiro robot comercial
1963	Primeiro sistema gráfico interactivo (versão inicial do desenho assistido por computador)
1988	Primeiro sistema de prototipagem rápida

A necessidade de se ter modelos físicos é a de perceber o conceito de um projecto, sendo por isso geralmente necessários antes do início da produção de um produto (Figura 2.1) (Kai e Fai, 1998). A existência de um modelo físico permite também que os diferentes profissionais envolvidos no processo de desenvolvimento de um produto percebam de forma clara aquilo que está em jogo (Gibson *et al.*, 2009; Kai *et al.*, 2003). Permite igualmente antecipar tarefas, adoptando metodologias de engenharia simultânea (Figura 2.2), minimizar erros detectando-os numa fase inicial do ciclo de desenvolvimento de produto, diminuindo assim os custos (Kai e Fai, 1998; Hindson *et al.*, 1998).

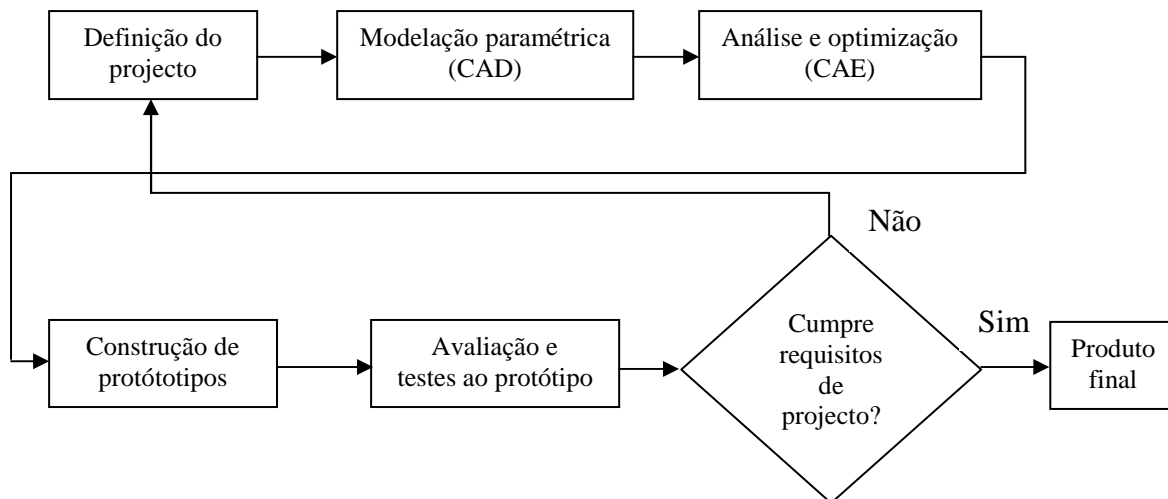


Figura 2. 1 – Fabricação aditiva no desenvolvimento de produto (Noorani, 2006)

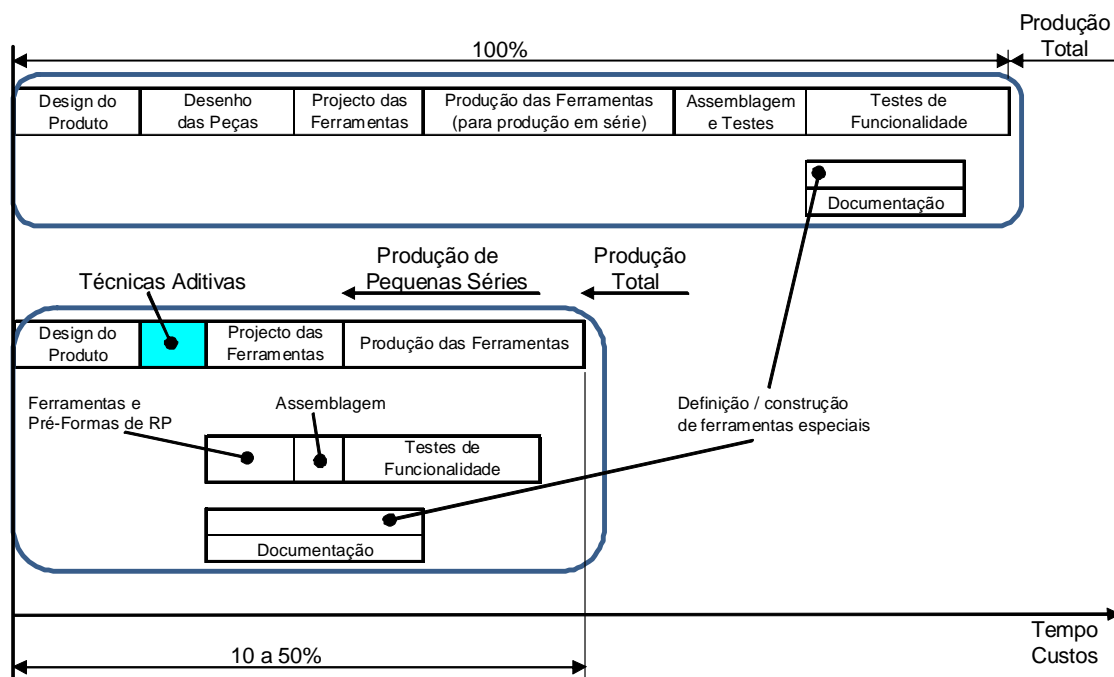


Figura 2. 2 -Processo convencional versus processo com introdução das tecnologias de fabricação aditiva no desenvolvimento de produto (Kai e Fai, 1998)

Os modelos físicos podem ser produzidos por várias técnicas que se classificam em: processos *substractivos*, *aditivos* ou *enformativos* (Figura 2.3) (Kai *et al.*, 2003; Hague *et al.*, 2004; Noorani, 2006).

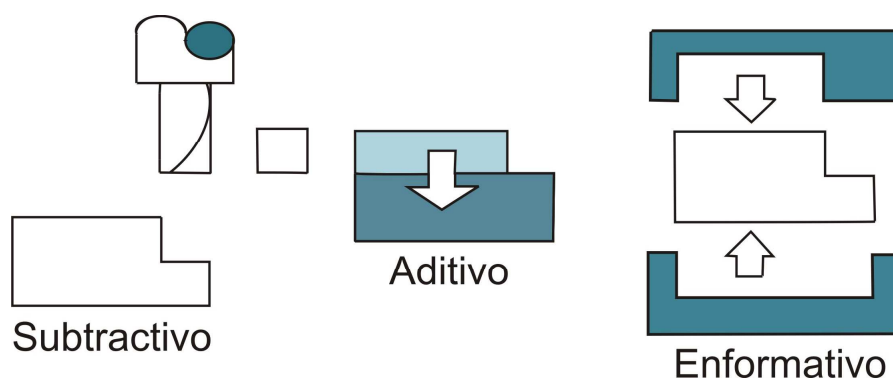


Figura 2. 3 -Métodos para a obtenção de protótipos e peças manufacturadas (Kai *et al.*, 2003; Noorani, 2006)

Nos **processos subtrativos**, a geometria pretendida é obtida por remoção de material de um bloco de material que dimensionalmente é maior que a peça final. Estes processos incluem processos de maquinaria CNC, tais como fresagem, torneamento, rectificação, electroerosão, corte por laser, corte por jacto de água, etc. (Jones, 1992; Lee, 1999; Noorani, 2006; Molcho *et al.*, 2008).

Nos **processos enformativos**, a forma pretendida é obtida por aplicação de forças mecânicas no material base. Exemplos destes processos são a dobragem, forjamento, a injeção de plásticos, termoformação, estampagem, etc. (Chua *et al.*, 2003; Noorani, 2006).

Os **processos aditivos** envolvem a fabricação de modelos camada a camada e serão descritos com mais detalhe nas secções seguintes (Gibson *et al.*, 2009; Levy, 2008; Levy *et al.*, 2003; Kruth *et al.*, 1998).

Quando existe a combinação de dois ou mais processos, estes denominam-se **processos híbridos** (Noorani, 2006).

2.2 – Processos aditivos

2.2.1– Classificação

As técnicas aditivas consistem na produção directa de objectos camada a camada a partir de modelos CAD 3D e compreendem um número muito significativo de

processos comercialmente disponíveis ou em fase de desenvolvimento tal como se indica na Figura 2.4 (Gibson *et al.*, 2009; Levy, 2008; Levy *et al.*, 2003; Kruth *et al.*, 1998). Os diversos processos existentes apresentam contudo características comuns em termos de fluxo de informação. Nas Figuras 2.5 e 2.6 indicam-se as diversas fases necessárias à produção de um protótipo usando técnicas aditivas.

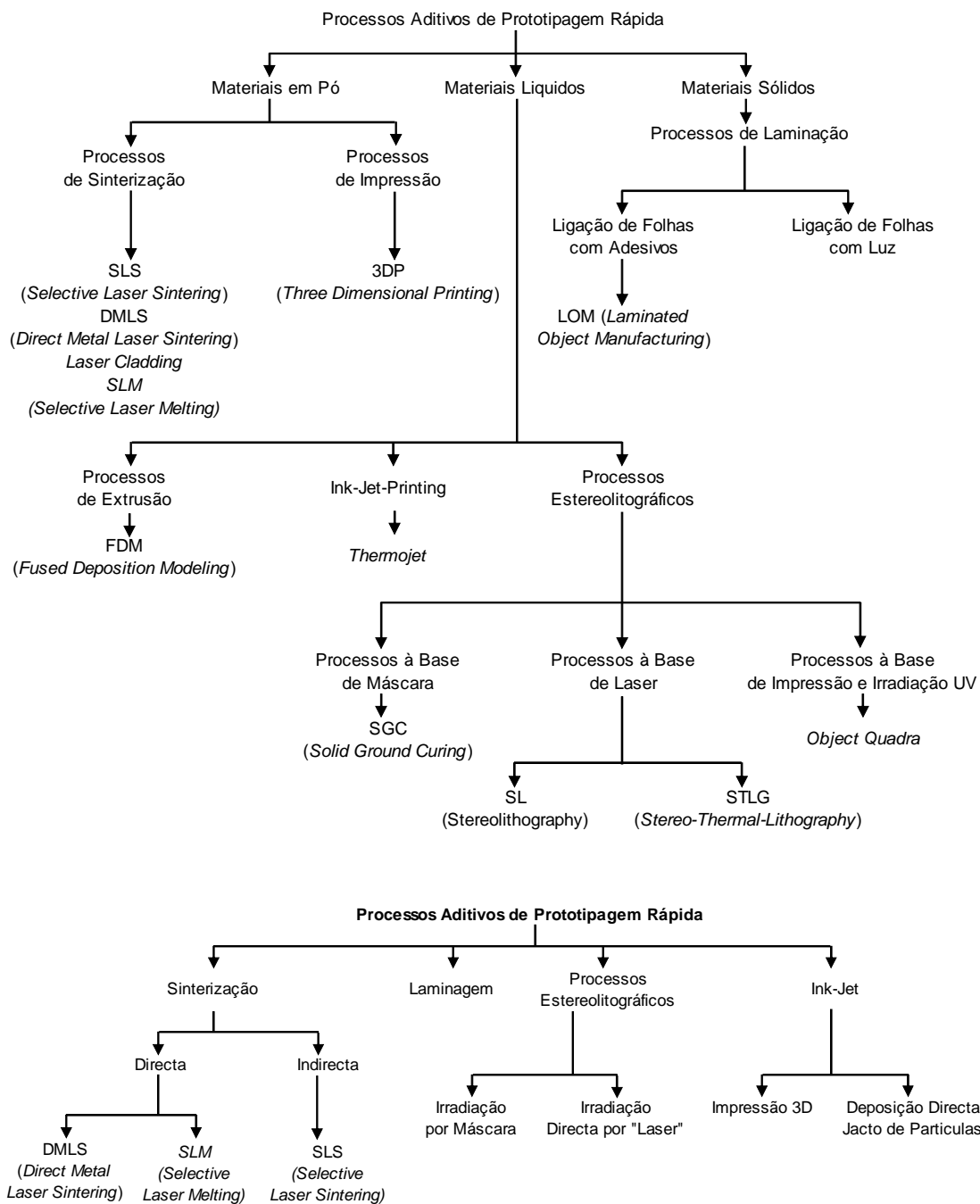


Figura 2.4 - a) Classificação dos processos de fabricação aditiva de acordo com o tipo de material a utilizar; b) Classificação simplificada (Bártolo, 2001; Bártolo e Mitchell, 2003)

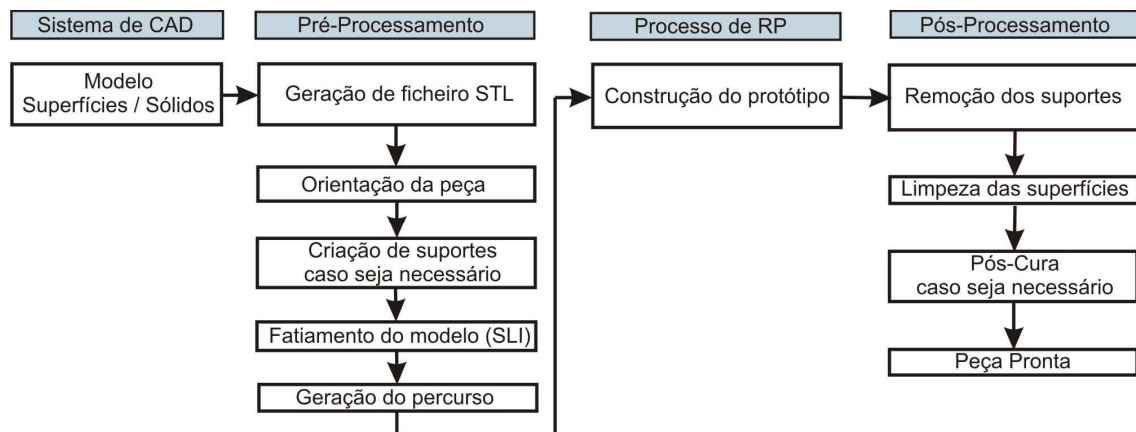


Figura 2. 5 - Fases do processo de prototipagem rápida (Venuvinod e Ma, 2004; RPDR, 2008)

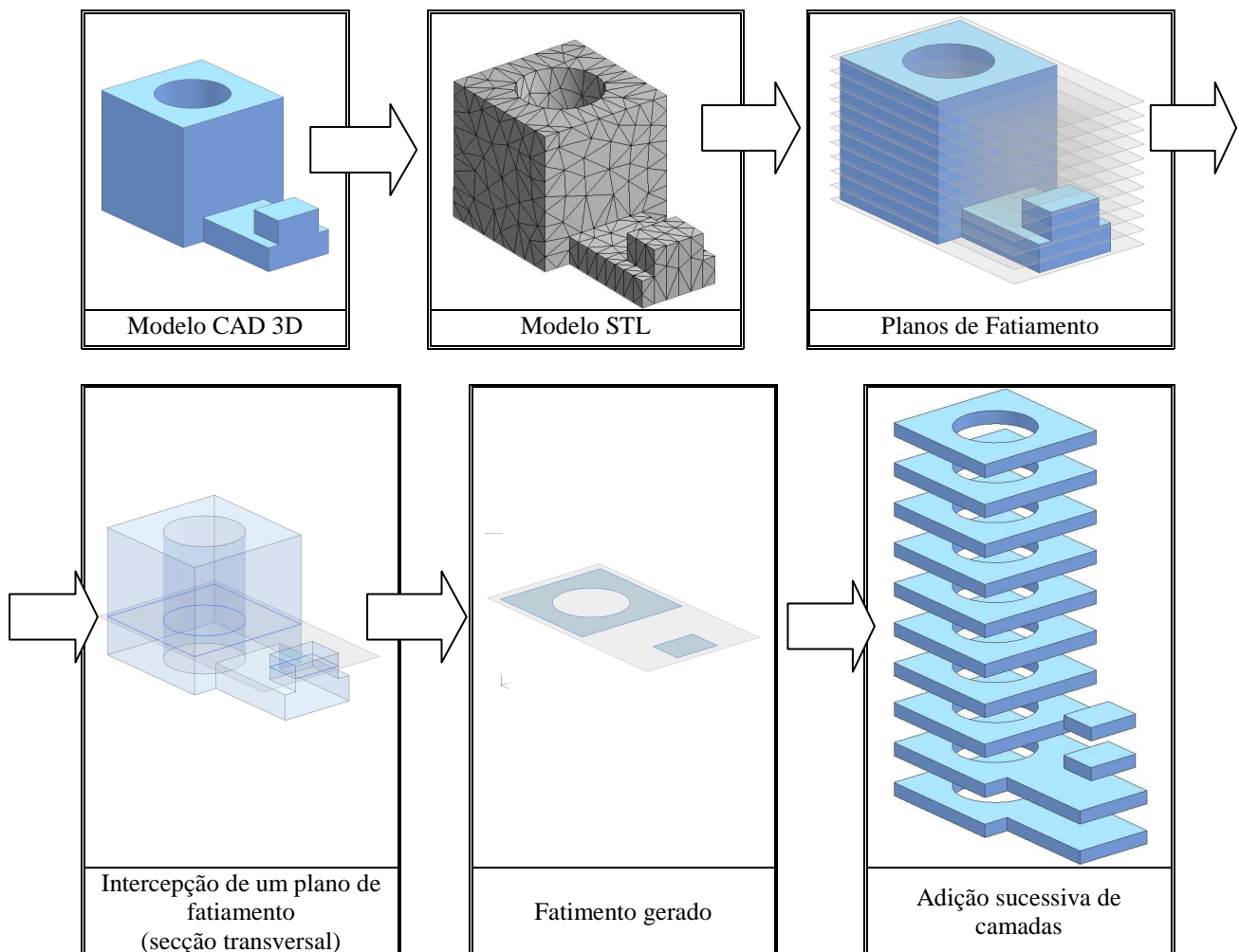


Figura 2. 6 - Fases do processo de prototipagem rápida (CIMJECT, 2008)

2.2.2– Principais etapas em fabricação aditiva

2.2.2.1– Geração do Modelo CAD

O primeiro passo para a criação de um protótipo é a realização de um modelo digital tridimensional (modelo de superfícies ou modelo sólido). Tal passa pela utilização de sofisticados softwares CAD, sistemas de CAD háptico ou escultura virtual, ou pela modificação de um conceito existente captado de forma digital através de tecnologias de engenharia inversa.

Quando o modelo é de superfícies, estas têm que estar completamente unidas, com todas as arestas coincidentes formando um volume completamente fechado. Os modelos sólidos são automaticamente um volume fechado (Bártolo e Mateus, 2002a; Noorani, 2006).

2.2.2.2– Modelo em formato STL

Uma vez criado o modelo CAD, este é convertido num modelo formato STL (*STereo Lithography*). Este formato, desenvolvido pela empresa *3D Systems* em 1987, é hoje, dada a sua simplicidade o formato standard em fabricação aditiva (Alves e Bártolo, 2006; Noorani, 2006).

Neste formato, as superfícies do modelo CAD são descritas através de uma malha envolvente de triângulos, que constituem do ponto de vista matemático à forma polinomial mais simples para descrição de uma superfície. Entidades como pontos, curvas e atributos tais como layers são ignorados na criação do ficheiro.

Estes ficheiros apresentam-se em dois formatos distintos: binário e ASCII. Nos ficheiros ASCII (Figura 2.7) cada triângulo é identificado pelas coordenadas dos três vértices definidos no sentido anti-horário (Figura 2.8) e pela normal exterior a cada triângulo, vector unitário que no caso de não estar definido é gerado de uma forma automática pela maioria dos softwares existentes (Alves e Bártolo, 2006; Rypl e Bittnar, 2008).

Tal como se indica na Figura 2.7, um ficheiro STL em ASCII começa com a palavra **solid** seguida do nome do ficheiro, e termina com a palavra **endsolid**. A definição de

cada triângulo começa com a palavra-chave **facet** e termina com a palavra **endfacet**. Cada vértice é descrito num registo **vertex** que lista as suas coordenadas (X, Y, Z). A definição dos vértices de cada triângulo é feita através de um ciclo iniciado com a palavra-chave **outer loop** e concluído com a palavra-chave **endloop** (Bártolo, 2010; Alves e Bártolo, 2006).

```

solid nome (name)
facet normal x y z
    outer loop
        vertex    x y z
        vertex    x y z
        vertex    x y z
    endloop
endfacet
endsolid nome (name)

```

Figura 2. 7 - Estrutura de um ficheiro STL em ASCII

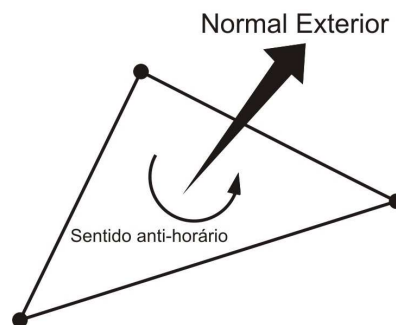


Figura 2. 8 - Representação da normal e da numeração dos vértices de cada triângulo (Alves e Bártolo, 2006; Fabbers, 2008)

O formato binário utiliza inteiros e vírgulas flutuantes para a representação numérica da rede triangular. Os primeiros 84 bytes são destinados ao cabeçalho (Figura 2.9) e por cada triângulo existente são ocupados mais 50 bytes com as coordenadas em x, y e z do vector da normal e dos três vértices. Os ficheiros STL em binário são mais pequenos que os correspondentes ficheiros em ASCII (Alves e Bártolo, 2006).

Tirando partido da existência de 2 bytes livres no formato STL-Binário, foi desenvolvido o formato cor que permite atribuir informação relativa à cor de cada

triângulo. Esta informação consiste em dizer se para um dado triângulo é atribuída uma cor específica ou não (1 ou 0) e por uma escala de intensidades RGB (*Red-Green-Blue*) de valores compreendidos entre 0 e 31.

Bytes	Descrição
80	Cabeçalho (Ignorado)
4	Número de triângulos
Para cada triângulo	
4	Componente x da normal
4	Componente y da normal
4	Componente z da normal
4	Coordenada x do vértice 1
4	Coordenada y do vértice 1
4	Coordenada z do vértice 1
4	Coordenada x do vértice 2
4	Coordenada y do vértice 2
4	Coordenada z do vértice 2
4	Coordenada x do vértice 3
4	Coordenada y do vértice 3
4	Coordenada z do vértice 3
2	Bytes livres

Figura 2. 9 - Estrutura de um ficheiro STL-binário

A definição de uma correcta rede de elementos triangulares deve obedecer às seguintes regras (Bártolo, 2010; Alves e Bártolo, 2006):

- Regra de orientação dos triângulos – a orientação de cada triângulo deve ser feita pela ordenação dos seus vértices no sentido anti-horário
- Regra adjacência - cada triângulo deve partilhar dois vértices com cada um dos triângulos que lhe é adjacente
- Regra de Mobius – no caso de triângulos adjacentes e dada a ordenação dos vértices a direcção de um lado de um triângulo é oposta à direcção do mesmo lado no triângulo adjacente.

2.2.2.4 – *Fatiamento do modelo (SLI)*

Uma vez obtido o ficheiro STL, este deve em seguida ser convertido numa série camadas de secções transversais finas através da intersecção de uma série de planos (XY) sobre o modelo tridimensional. De notar, que a definição correcta dos modelos a reproduzir dependerá do número de elementos triangulares utilizado na definição do modelo STL (Figura 2.10). Contudo, ficheiros com maior número de triângulos

requerem maior tempo de processamento. A orientação do modelo terá igualmente um grande efeito sobre a qualidade dos modelos finais (Bártolo, 2010).

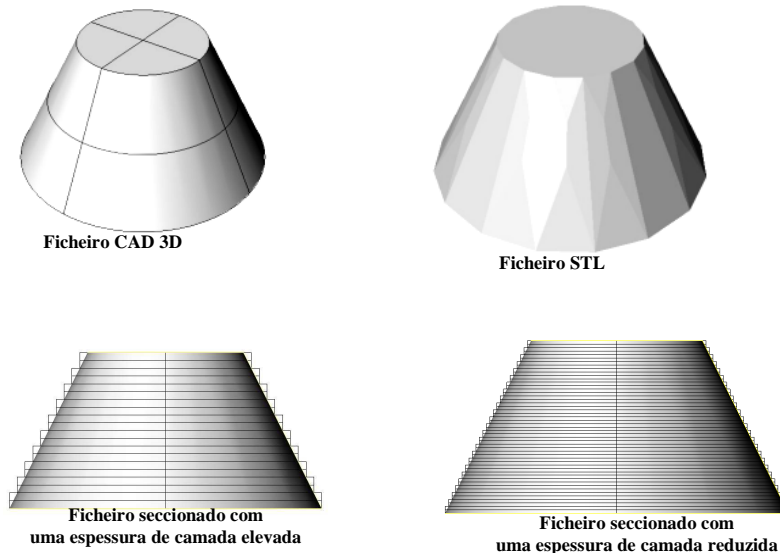


Figura 2. 10 - Comparação dos desvios associados à espessura de camada

De modo a aumentar-se a rapidez de fatiamento dos modelos STL e aumentar a precisão dimensional através da redução do chamado efeito de escada, têm sido propostos vários algoritmos, de que se destacam os seguintes:

- Seccionamento adaptativo com superfícies de camada inclinadas (Hope *et al.*, 1997; Sabourin *et al.*, 1997). Esta estratégia permite uma aproximação muito grande entre o ficheiro de CAD original e o ficheiro relativo ao seccionamento. Contudo, a generalidade dos sistemas de prototipagem rápida não permite a execução de camadas com superfície inclinada;
- Seccionamento adaptativo com espessuras de camada variável (Tata *et al.*, 1998). Tal como a estratégia de seccionamento anterior, o seccionamento adaptativo de espessura variável permite uma redução no tempo de produção, através da diminuição do número de camadas mediante o ajustamento selectivo das espessuras de acordo com requisitos de precisão. Esta estratégia permite igualmente o aumento da qualidade superficial das peças obtidas. Por outro lado, tal como no caso anterior a grande limitação desta estratégia reside no facto da

generalidade dos sistemas de prototipagem rápida não permitir a execução de camadas com espessura variável;

- Seccionamento de ficheiros STL de grande dimensão baseados na técnica pick-and-drop (Choi e Kwok, 2002). Esta estratégia permite o seccionamento de ficheiros de grande dimensão sem constrangimentos ao nível da memória do computador, permitindo o processamento de ficheiros STL com elevada dimensão, assim como espessuras de camada muito reduzidas. O excessivo tempo de processamento constitui a principal desvantagem desta estratégia de seccionamento.

O efeito do número de triângulos e do número de camadas no tempo de criação dos ficheiros SLI é quantificado pela chamada *dimensão do problema* de acordo com a seguinte equação (Bártolo e Mateus, 2002a):

$$D.P. = 0.25N_t + 0.75N_c \quad (2.1)$$

onde D.P. é a dimensão do problema, N_t é o número de triângulos e N_c é o número de camadas. Quanto maior for a dimensão do problema, maior será o tempo necessário para se poder gerar um ficheiro SLI (Bártolo e Mateus, 2002a).

2.2.2.5 – Pré-Processamento

2.2.2.5.1 – Orientação da peça

A orientação do modelo a construir influencia a qualidade superficial do modelo final (Figura 2.11), o tempo de construção, a necessidade de suportes estruturais e alguns problemas associados ao processo de fabrico tais como distorções, empenos, tensões residuais, etc. (Bártolo e Mateus, 2002a; CIMJECT, 2008). A orientação determina igualmente o grau de anisotropia dos modelos, característica que depende também da estratégia de varrimento de cada camada, potência do laser, temperatura, etc. (Silva 2007).

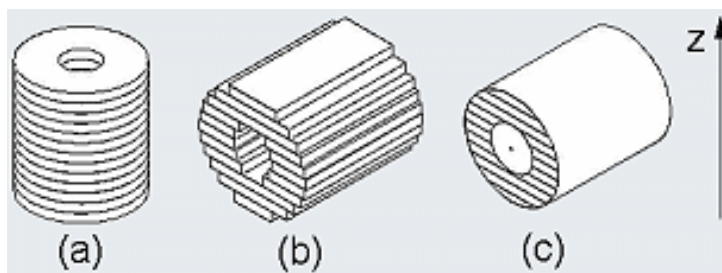


Figura 2. 11 - Peças (a) e (b) obtidas com diferentes orientações (CIMJECT, 2008)

2.2.2.5.2 – Geração de suportes estruturais

Na maioria dos processos de fabricação aditiva (processos estereolitográficos, extrusão e algumas estratégias do tipo ink-jet printing) as zonas sem apoio ou em balanço necessitam ter suportes estruturais. Os suportes estruturais são usados para fixar o modelo ao elevador, evitando a sua construção directamente sobre a plataforma, possibilitando assim a sua remoção sem danificação. Permitem igualmente compensar qualquer desalinhamento angular e reduzir o risco de empenos e distorções.

Após o processo de fabricação dos modelos a remoção dos suportes estruturais pode ser realizada através de (Silva, 2007):

- Remoção mecânica
- Remoção por dissolução química
- Remoção térmica. Neste caso o material de suporte deve possuir menor temperatura de fusão que o material de construção do modelo.

De notar que quanto maior for a quantidade de suportes estruturais, maior será o tempo de processamento e pós-processamento e maior o desperdício de material.

2.2.2.5.3 – Efeito de escada

Qualquer processo de fabrico é um processo aproximado. Contudo, os processos aditivos são do ponto de vista da precisão dimensional, em regra menos precisos que os processos substractivos convencionais. Alguns dos erros inerentes ao processo são:

- Erros de resolução;

- Erros devido à existência de um número insuficiente de triângulos;
- Erros associados à existência de uma malha inadequada de triângulos;
- Erros de pós-processamento (empenos, contracções etc.);
- Erros devido à espessura das camadas.

A criação de objectos por camadas está vulgarmente associado uma estrutura tipo “escada”, como se mostra na Figura 2.12. Este fenómeno pode ser diminuído mediante a redução da espessura de cada camada, com consequências neste caso no aumento do tempo de construção (figura 2.13).

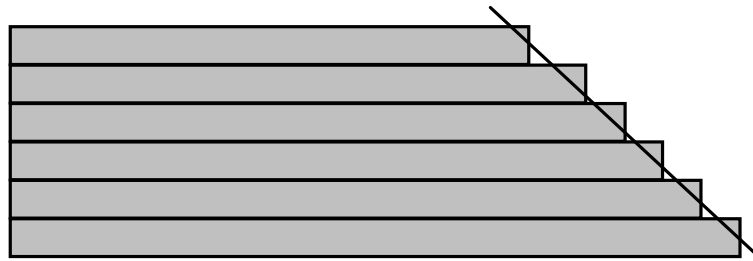


Figura 2. 12 - Efeito escada na definição de uma superfície inclinada 45°

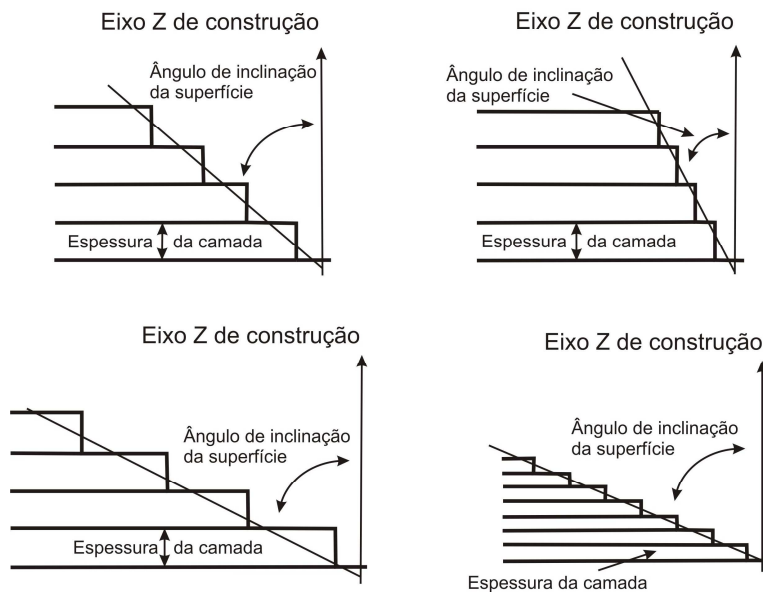


Figura 2. 13 - Efeito de escada em função do ângulo de inclinação da superfície e espessura da camada (Silva, 2007)

Nestes casos pode definir-se uma rugosidade superficial correspondendo ao desvio absoluto da dimensão obtida relativamente à dimensão pretendida. Se a camada tiver espessura t a rugosidade máxima R_{max} , corresponde a (Bártolo e Mateus, 2002a):

$$R_{\max} = \frac{t}{2\sqrt{2}} \quad (2.2)$$

sendo a rugosidade média, R_{med} , dada por,

$$R_{\text{med}} = \frac{t}{4\sqrt{2}} \quad (2.3)$$

No caso geral, se θ for a inclinação da superfície pretendida e t a espessura de cada camada a rugosidade máxima é dada por,

$$R_{\max} = \frac{t}{2} \cos \theta \quad (2.4)$$

e a rugosidade média por,

$$R_{\text{med}} = \frac{t}{4} \cos \theta \quad (2.5)$$

De modo a minimizar a rugosidade, o protótipo é construído com dimensões superiores às do modelo CAD, para posterior remoção do material em excesso através de operações de acabamento superficial (projectção de areia, polimento, pintura, etc.) (Bártolo e Mateus, 2002a).

2.2.3– Processos estereolitográficos

Os processos estereolitográficos envolvem mecanismos de irradiação e cura (solidificação) de resinas líquidas fotossensíveis de baixa viscosidade, podendo ser classificados, função do mecanismo de irradiação, como (Figura 2.14) (Gaspar *et al.*, 2008; Bártolo e Gaspar, 2008; Bártolo, 2001; Bártolo, 2010):

- Processos de irradiação directa.
- Processos de irradiação por máscara.

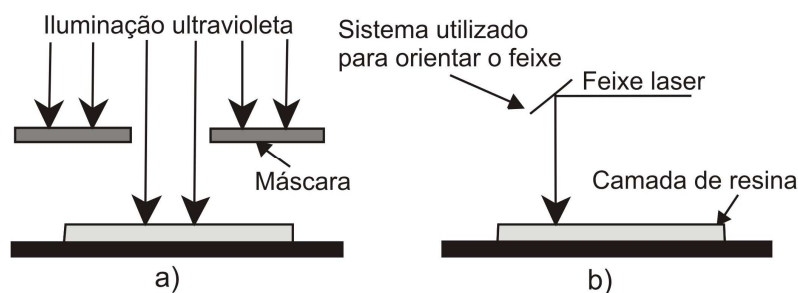


Figura 2. 14 - Processos estereolitográficos. a) Irradiação por máscara. b) Irradiação directa (Bártolo, 2001)

No caso dos processos de irradiação directa, o mecanismo de cura pode ser desencadeado pela absorção de um fóton de radiação (iniciação mono-fotónica), processo mais comum, ou pela absorção de dois ou mais fótons de radiação (iniciação bi ou multi fotónica) (Bártolo, 2010). Os processos de irradiação por máscara são sempre processos mono-fotónicos envolvendo a exposição luminosa de resinas através de uma máscara a partir da radiação emitida por uma lâmpada.

Os processos de irradiação directa com iniciação mono-fotónica compreendem ainda as seguintes estratégias de construção (Bártolo, 2010):

- Processos com radiação ultra-violeta (estereolitografia convencional).
- Processos com radiação infra-vermelha (estereolitografia de CO₂).
- Processos com radiação ultra-violeta e infra-vermelha (estereo-termo-litografia).

Os processos estereolitográficos aplicam-se quer à produção de objectos macroscópicos quer á produção de objectos microscópicos (microestereolitografia).

2.2.3.1.1– Estereolitografia convencional (radiação ultra-violeta)

A estereolitografia convencional foi desenvolvida e patenteada por Charles Hull (Hull, 1986). Este foi o primeiro processo de fabricação aditiva (Figura 2.15) a ser comercializado, tendo sido apresentado em 1988 pela empresa 3D Systems Inc (Bártolo, 2010). A estereolitografia convencional consiste na construção de modelos físicos camada-a-camada através de um processo de solidificação ponto-por-ponto. Nestes sistemas um laser emitindo no domínio dos ultravioletas varre a superfície de uma

resina líquida solidificando uma série de pequenos elementos de volume designados por voxel (pixel tridimensional) (Bártolo, 2010; Gibson *et al.*, 2009). A maior ou menor sobreposição de voxels polimerizados (grau de sobreposição das linhas de varrimento - overlap) determina o grau de cura da estrutura final e o tempo de construção (Figura 2.16)

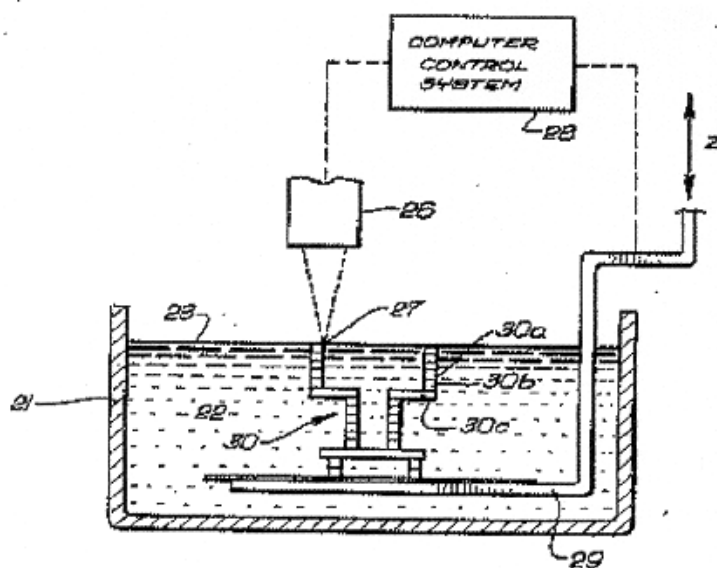


Figura 2. 15 - Processo de estereolitografia patenteado por Hull (1996)

Os actuais sistemas de estereolitografia consistem num computador que serve de unidade de controlo do equipamento, numa tina contendo uma resina termoendurecível fotossensível, numa plataforma de trabalho móvel, num laser e num sistema óptico para dirigir o feixe de radiação (Bártolo, 2010). Existem igualmente duas estratégias diferentes de construção dos modelos:

- Sistemas de construção descendentes.
- Sistemas de construção ascendentes.

Nos sistemas de construção descendente o laser faz o varrimento da superfície da resina, solidificando uma camada que é correspondente à secção transversal do modelo 3D (Figura 2.17). Após a construção da camada, a plataforma elevatória baixa um valor igual à espessura da camada seguinte de modo a permitir que a resina cubra a camada anteriormente curada. O processo repete-se até que a camada final seja definida

(Noorani, 2006). Estes sistemas possuem um nivelador (sistema de recoat) que tem como função reduzir as tensões superficiais do modelo e estabilizar a superfície da resina líquida, reduzindo ao mínimo o tempo de processamento de cada camada. Contudo, a existência de um sistema de recoat aumenta o tempo de construção e a complexidade do equipamento (Bártolo e Mateus, 2002b).

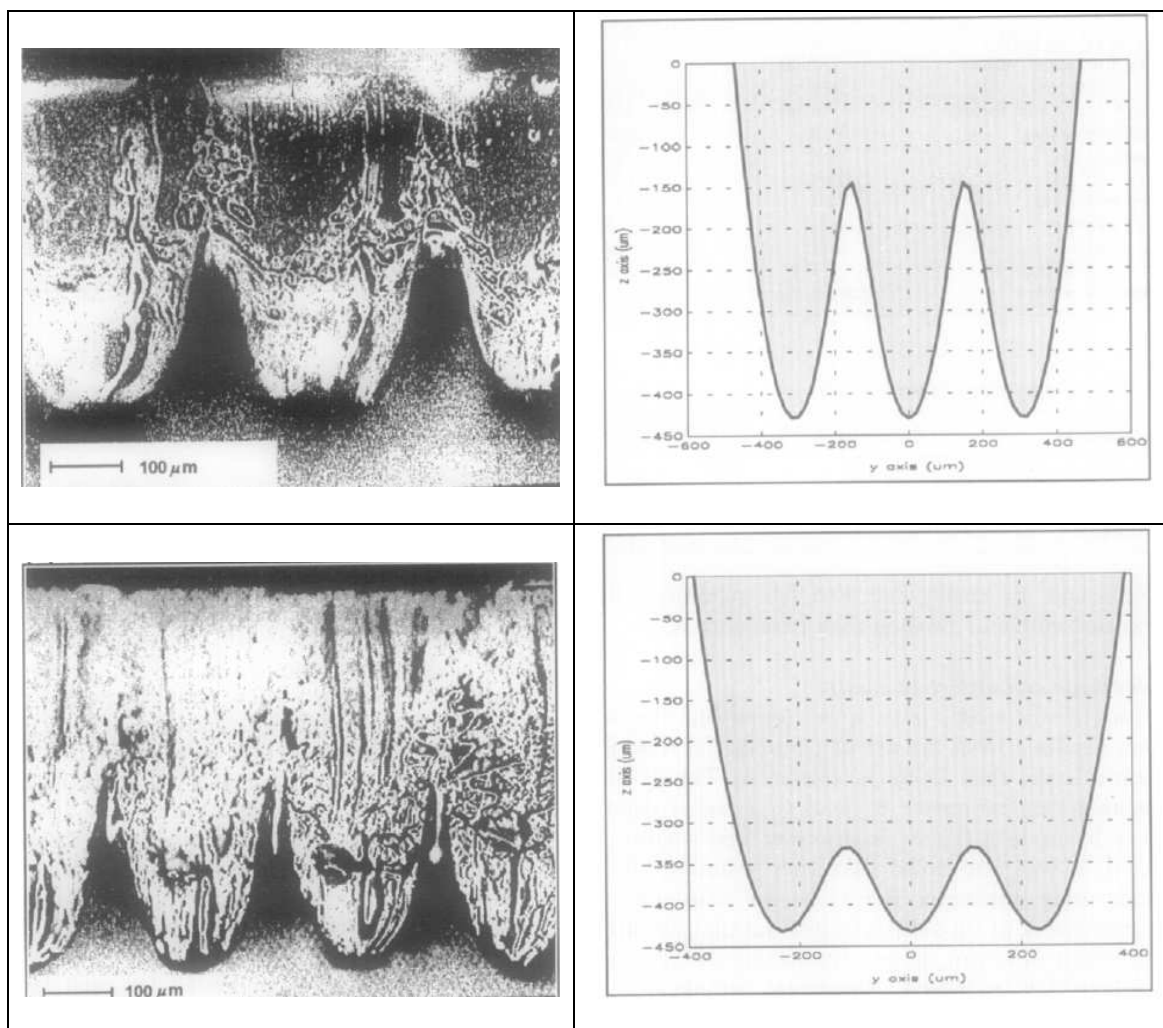


Figura 2. 16 - Efeito do grau de sobreposição entre linhas de varrimento (Fuh *et al.*, 1995)

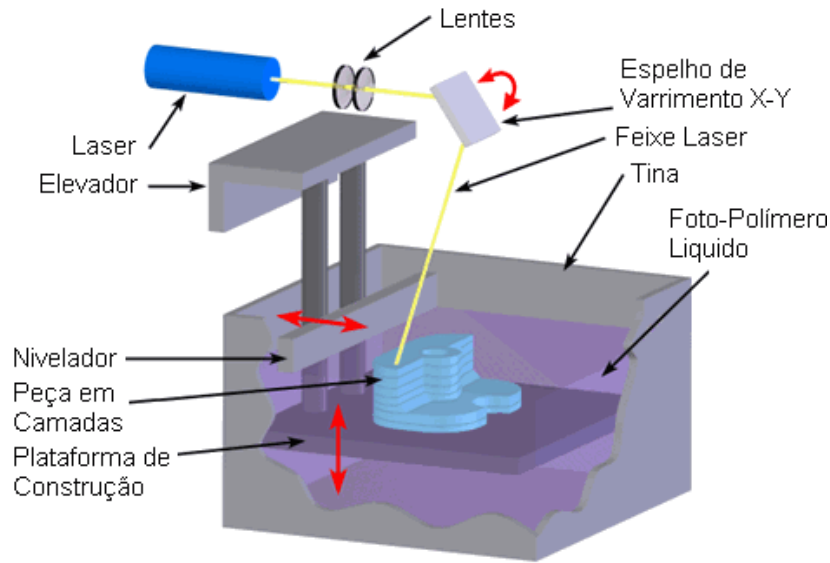


Figura 2. 17 - Sistema de construção descendente (Custompart.Net, 2009)

A energia crítica, E_c , para se desencadear o mecanismo de polimerização é dada por (perfil Gaussiano) (Bártolo, 2010):

$$E_c = E_{\max} \exp\left(-\frac{C_d}{D_p}\right) \quad (2.6)$$

$$C_d = D_p \ln\left(\frac{E_{\max}}{E_c}\right) \quad (2.7)$$

com E_{\max} a energia máxima do feixe laser, D_p a profundidade de penetração e C_d a profundidade de cura. O perfil da linha de varrimento laser é indicado na Figura 2.18.

Ao contrário dos sistemas descendentes, os sistemas construção ascendente possuem uma plataforma que sobe, após a construção de cada camada, uma distância igual à espessura da camada seguinte pelo que o laser irradia a superfície inferior da resina líquida através de uma janela em vidro posicionada na base da tina. Esta janela garante a uniformização e regularidade da espessura de cada camada de resina, eliminando a necessidade de nivelador.

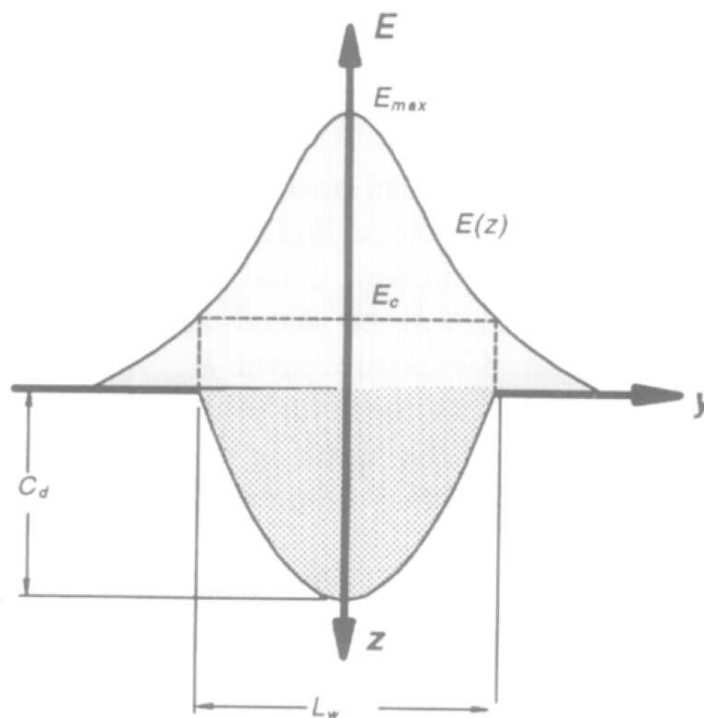


Figura 2. 18 - Perfil da linha de varrimento

Para a definição de cada camada, foram desenvolvidas as seguintes estratégias de varrimento (Bártolo e Mateus, 2002b):

- **Star-Weave:** estratégia usada quando se pretendem grandes velocidades de produção. As linhas de varrimento são construídas bastante espaçadas pelo que existe uma grande quantidade de resina não polimerizada entre elas.
- **ACES (*Accurate Clear Epoxy Solid*):** utilizada para a obtenção de modelos em resina epoxidica de elevada densidade, não requerendo operações de pós-cura.
- **QuickCast:** estratégia utilizada na produção de modelos parcialmente ocos destinados a fundição por modelos perdidos. Nesta estratégia é construída uma estrutura interna reticulada, bem como furos de drenagem, de modo a permitir o escoamento por gravidade das resinas não polimerizadas.

Devido às técnicas de varrimento utilizadas no processo de construção, bem com a fenómenos químicos e físicos associados ao processo de solidificação (Bártolo, 2001), os modelos quando são removidos da plataforma de construção tem que ser submetidos

a uma operação adicional de pós-cura (Bártolo e Mateus, 2002b). Esta operação decorre por exposição dos modelos a uma intensa radiação ultravioleta, calor ou por imersão em banho químico que contem um agente acelerador da reacção de solidificação.

2.2.3.1.2– *Estereolitografia de CO₂*

O processo de estereolitografia de CO₂, desenvolvido por Marco Scarparo na Universidade de Campinas (Brasil), utiliza radiação infravermelha para desencadear o processo de cura de resinas termoendurecíveis que possuem uma determinada concentração de termo-iniciador (Figura 2.19) (Jardini e Filho, 2010; Jardim *et al.*, 2004a, 2004b; Scarparo *et al.*, 1997; Barros *et al.*, 1994). Ao sistema polimérico é adicionado uma determinada quantidade de sílica (agente absorvedor de calor) de modo a controlar a zona de cura e evitar problemas devido a mecanismos de difusão de espécies reactivas e fenómenos de condução térmica (Jardini *et al.*, 2003). O sistema foi desenvolvido usando resinas de base epoxidica.



Figura 2. 19 - Sistema de estereolitografia de CO₂ e alguns componentes produzidos (Jardini e Filho, 2010)

2.2.3.1.3– Estereo-termo-litografia

O processo de estereo-termo-litografia (STGL, *Stereo-Thermal-LithoGraphy*) é uma estratégia de fabricação desenvolvido por Bártolo (Bártolo, 2001; Bártolo e Mitchell, 2003). Neste processo é utilizada uma resina termoendurecível que contém pequenas quantidades de termo-iniciador e foto-iniciador, sendo o processo de cura iniciado simultaneamente por efeitos térmicos (utilizando a radiação infravermelha) e por acção de radiação ultra-violeta. As concentrações de ambos os iniciadores têm que ser criteriosamente controladas de modo a evitar que se inicie qualquer mecanismo de polimerização por acção isolada da temperatura ou radiação ultravioleta. Deste modo, ao longo da trajectória da radiação infravermelha ou da radiação ultravioleta, a quantidade de espécies iniciadora criadas não é suficiente para desencadear reacções de polimerização. Contudo na zona de intercepção dos dois efeitos, a concentração de espécies iniciadoras é suficiente para dar início ao processo de cura. A temperatura é

utilizada para produzir radicais através da fragmentação de termo-iniciadores e simultaneamente para aumentar a taxa de reacção foto-iniciada. As principais vantagens deste processo são (Bártolo, 2001; Bártolo e Mitchell, 2003):

- a utilização da temperatura para controlar a cinética da reacção, permite eliminar a operação de pós-cura (o aumento da temperatura aumenta a quantidade de material solidificado).
- a utilização de temperatura para aumentar a taxa de reacção permite reduzir a intensidade de radiação ultravioleta necessária ao processo de polimerização, o que se poderá traduzir na obtenção de um sistema mais barato.
- são usadas pequenas concentrações de iniciadores, o que permite maiores profundidades de penetração (solidificação de camadas mais espessas).
- o aumento da taxa de reacção com a temperatura permite um melhor controlo sobre o processo de cura. Como consequência, a cura é mais localizada.
- utilização de temperatura para controlar a cinética da reacção aumenta a versatilidade deste sistema.

Actualmente o Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado de Produto do Instituto Politécnico de Leiria, no âmbito do projecto “Multimaterial microstereo-termo-litografia (microSTLG) - PTDC/EME-PME/098037/2008”, financiado pela Fundação para a Ciência e Tecnologia, está a desenvolver um sistema de fabricação multi-material utilizando o princípio da estéreo-termo-litografia. Este sistema contém uma tina contendo vários reservatórios de material (Figura 2.20), permitindo assim a construção de componentes com gradientes funcionais para aplicações em medicina, electrónica e automóvel (Bártolo, 2010).

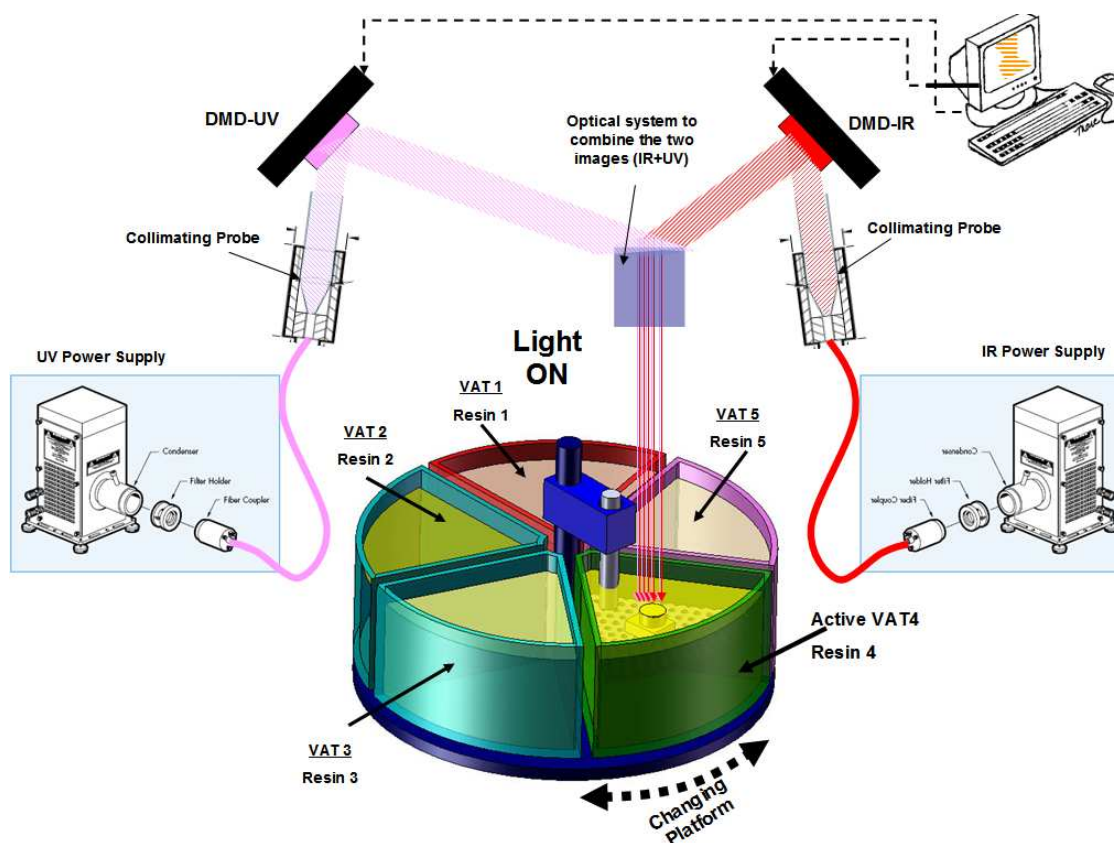


Figura 2. 20 - Sistema de estéreo-termo-litografia multimaterial (Bártolo, 2010)

2.2.3.1.4– Processos de irradiação por máscara

O processo de irradiação por máscara foi inicialmente proposto por Fudim (Fudim, 1988; Fudim, 1989) e posteriormente desenvolvido por Pomerantz (Pomerantz *et al.*, 1990, 1996), e consiste na utilização de uma máscara que é colocada entre uma lâmpada de ultravioletas e a camada de resina a solidificar (Bártolo e Gibson, 2010).

A máscara (imagem negativa da secção transversal que se pretende obter) é criada, a partir da informação contida no ficheiro SLI, num substrato transparente, por um processo de impressão ionográfica, similar ao processo xerográfico usado nas fotocopiadoras e impressoras laser (Kai *et al.*, 2003). A irradiação é realizada por uma lâmpada emitindo radiação ultravioleta de alta potencia colimada (Kai *et al.*, 2003).

Este sistema requer a geração de muitas máscaras bem como alinhamentos precisos entre elas. Uma solução para este problema, é o uso de uma máscara flexível do tipo

LCD (*liquid crystal display*). No processo de construção é utilizada cera solúvel em água para criar suportes estruturais (Kai *et al.*, 2003).

Em comparação com os sistemas de irradiação directa, estes sistemas são menos eficientes energeticamente, e experimentalmente verificou-se que os sistemas monocromáticos para espessas camadas de resina realizam uma polimerização mais uniforme (Bártolo, 2001).

O processo de irradiação por máscara foi comercializado pela empresa Israelita Cubital sob a designação SGC (*Solid Ground System*) (Figura 2.21) (Kai *et al.*, 2003). Este processo compreende as seguintes etapas:

- 1** – A imagem da camada é produzida usando toner numa placa de vidro, para criar uma foto-máscara.
- 2** – Uma fina camada de resina é aplicada na área de trabalho. A espessura desta camada é maior que a espessura desejada, de modo a permitir a maquinação posterior da sua superfície.
- 3** – A foto-máscara é colocada ligeiramente acima da área de trabalho e ambas são alinhadas debaixo de uma lâmpada UV colimada.
- 4** – A luz UV é ligada durante uns segundos polimerizando somente as zonas pretendidas de acordo com a foto-máscara.
- 5** – A resina não solidificada é removida da área de trabalho por sucção a vácuo.
- 6** – Cera derretida é depositada na área de trabalho de modo a preencher as zonas antes ocupadas pela resina não polimerizada, servindo de suporte.
- 7** – Cada camada é maquinada de modo a obter-se uma espessura precisa.
- 8** – A área de trabalho é reposicionada, colocando-se na posição de irradiação.
- 9** – Uma nova camada de resina é aplicada na placa de trabalho, e o ciclo repete-se até à conclusão do protótipo.

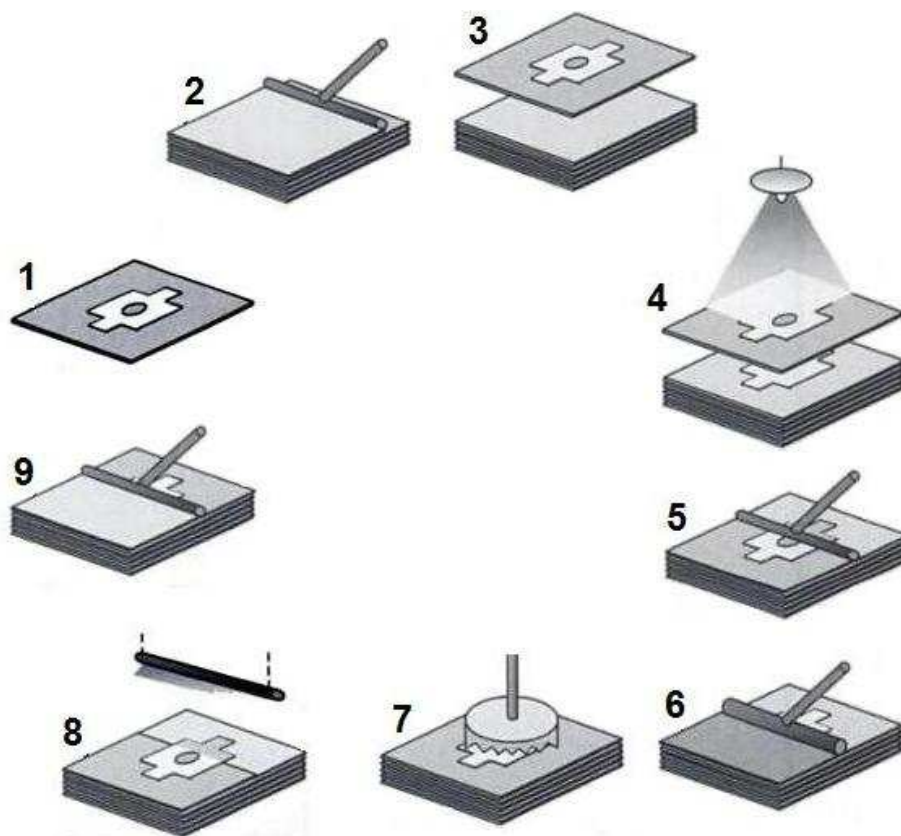


Figura 2. 21 - Representação esquemática das várias etapas do processo SGC (Kai *et al.*, 2003)

O sistema SGC possui as seguintes vantagens (Bártolo, 2001; Kai *et al.*, 2003):

- Devido à cura da totalidade da área da secção transversal da camada ser instantânea, a velocidade de processamento é mais rápida.
- Boas tolerâncias dimensionais.
- Baixas contracções.
- A estratégia de cura adoptado minimiza o desenvolvimento de tensões internas na estrutura.

Possui igualmente as seguintes desvantagens (Kai *et al.*, 2003):

- Equipamento demasiado volumoso.

- Nem toda a cera é removida. A cera adere aos cantos e fendas sendo difícil de remover em peças com geometria complexa ou fica retida no interior dos modelos no caso de existirem cavidades internas.
- Produção de desperdício.
- Elevado nível de ruído fruto da etapa de maquinação.

2.2.3.1.5– Micro Estereolitografia

A micro-estereolitografia é um processo similar à estereolitografia convencional, que tem como objectivo a produção de objectos de dimensões micrométrica ou de resolução micrométrica (Zhang *et al.*, 1999; Bertsch *et al.*, 2004; Bártolo, 2010).

Existem várias estratégias de fabricação, destacando-se as seguintes (Zhang *et al.*, 1999; Bertsch *et al.*, 2004; Bártolo, 2010):

- Técnicas de superfície constrangida. Este processo envolve a irradiação directa por laser sobre uma tina contendo resina. Envolve mecanismos ópticos de diminuição do ponto de exposição laser.
- Técnicas de superfície livre. Este processo envolve a irradiação directa por laser através de uma placa transparente que garante o nivelamento preciso de cada camada de resina.
- Processos integrais utilizando irradiação por lâmpada.

A micro-estereolitografia integral é a estratégia de construção mais recente. Nesta técnica, a solidificação de cada camada é realizada de uma só vez, projectando a imagem correspondente na superfície da resina foto-polimerizável por intermédio de um LCD ou dispositivo digital de micro-espelhos.

O Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado de Produto do Instituto Politécnico de Leiria encontra-se a desenvolver um sistema de micro-estereolitografia integral. O sistema (Figura 2.22) compreende uma fonte de luz que consiste numa lâmpada de mercúrio de 200 W apresentando três picos fundamentais de radiação (320-390 nm com intensidade de radiação de 17 W/cm², 390-450 nm com intensidade de

radiação de 20 W/cm^2 e 280-320 nm com intensidade de 7 W/cm^2) e um shutter para o on-off da radiação, um conjunto de filtros e lentes colimadoras que garantem a selecção adequada do comprimento de onda, um DMD (*Digital Micro-Mirror Device*) (Figura 2.23) de radiação ultra-violeta cuja função é definir a micro-imagem de cada secção transversal do micro-objecto a construir, uma lente ZEISS para redução da “imagem” correspondente a cada secção transversal a construir (redução máxima 10x) e a área de construção constituída por uma plataforma móvel contendo o reservatório de resina. A alimentação do reservatório (não indicada na figura) é feita por uma bomba peristáltica a partir de um reservatório adicional.

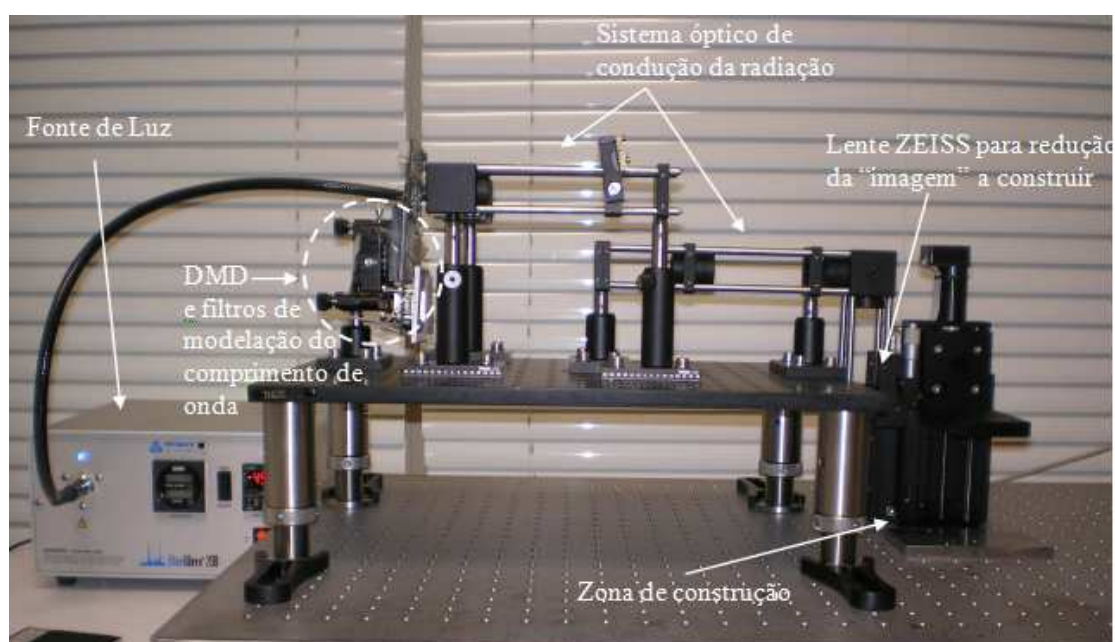


Figura 2. 22 - Sistema de micro-estereolitografia integral em desenvolvimento no Centro para o Desenvolvimento Rápido e Sustentado de Produto do Instituto Politécnico de Leiria

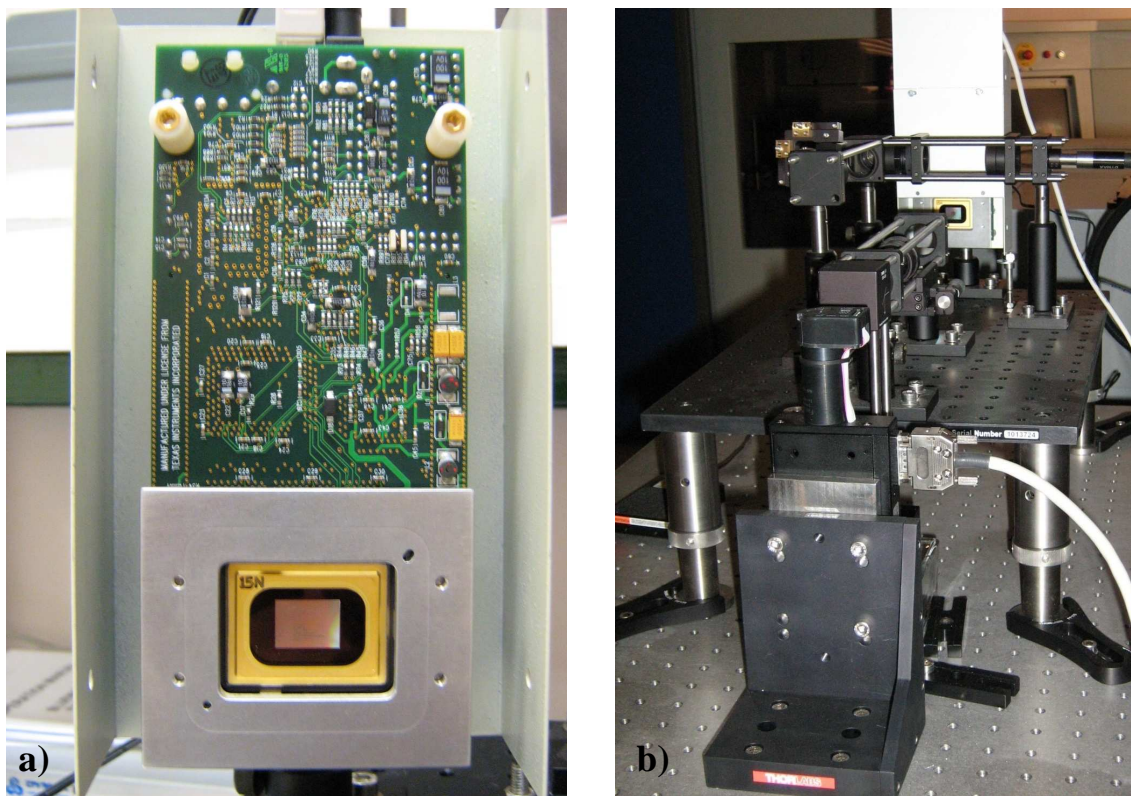


Figura 2. 23 - a) Sistema DMD, b) Sistema de fixação do DMD no equipamento de micro-estereolitografia

A plataforma móvel foi fabricada em alumínio e possui quatro suportes para o correcto nivelamento. A deslocação vertical da plataforma é garantida por um posicionador uniaxial MICOS® Translation Stage VT-80. Este posicionador permite incrementos verticais de 1 μm a uma velocidade que varia entre 0.001 e 20 mm/s.

3 – MATERIAIS E TÉCNICAS

3.1 – Materiais

3.1.1 – Material utilizado

Neste trabalho de investigação o sistema polimérico utilizado foi o *Accura 45HC* (resina epoxidica) fornecida pela empresa 3D Systems (Estados Unidos da América), cujas características são indicadas na Tabela 3.1. Trata-se de um sistema com excelente resistência térmica sendo utilizado para produção de protótipos funcionais. As suas principais aplicações são:

- Modelos para testes a altas temperaturas.
- Modelos com paredes finas que requeiram alta dureza e durabilidade.
- Modelos funcionais e para testes de montagem.
- Modelos para fundição utilizando-se a estratégia de varrimento QuickCast.
- Conjuntos para montagens rígidas.

3.1.2 – Fotopolimerização

A maioria dos sistemas foto-polimerizáveis disponíveis no mercado são constituídos por:

- **Oligómero ou pré-polímero.** Determina as propriedades do polímero (Bártolo e Mateus, 2003). São tipicamente polímeros com baixo peso molecular com dois a cinco unidades de monómero. Sistemas à base de uretanos, acrilatos, e sistemas epoxidicos são dos mais utilizados em aplicações estereolitográficas (Venuvinod e Ma, 2004).
- **Diluyente** (monómeros de baixo peso molecular): controlam a viscosidade e as propriedades mecânicas do modelo (Venuvinod e Ma, 2004).

- **Foto-iniciador:** Absorve a energia fornecida pelo feixe laser e inicia a polimerização através da formação de espécies reactivas (radicais livres ou catiões).
- **Aditivos.**

Tabela 3. 1 - Principais características da resina Accura 45HC plastic

Material no estado liquido		
Propriedade	Condições	Valor
Aparencia		Âmbar Claro
Densidade liquida	@ 25°C	1.14 g/cm ³
Densidade sólida	@ 25°C	1.2 g/cm ³
Viscosidade	@ 30°C	0.475 Pa.s
Profundidade de penetração (Dp)		0.130 mm
Exposição crítica		7.4 mJ/cm ²
Tipos de estrutura testados		FAST, EXACT e QuickCast
Material após cura		
Propriedade	Condições	Valor
Resistencia à tracção	ASTM D 638	59 - 61 MPa
Modulo à tracção	ASTM D 638	2760 - 2960 MPa
Alongamento até partir (%)	ASTM D 638	4.8 - 5.4 %
Resistencia à fleccção (<i>flexural strenght</i>)	ASTM D 790	94 - 101 MPa
Módulo à fleccção (<i>flexural modulus</i>)	ASTM D 790	2760 - 2900 MPa
Resistencia ao impacto (notched izod)	ASTM D 256	11 - 16 J/m
	ASTM D 648	
Temperatura de deflexão térmica	@ 0.455 Mpa (66 PSI)	58°C
Heat Deflection Temperature (HDT)	@ 1.82 MPa (264 PSI)	51°C
	@ 0.455 MPa (66 PSI) c/ Pós-cura a 160°C	103°C
Dureza Shore D		87
Coeficiente de expansão térmica (CTE)	ASTM E 831-93	
	TMA (T<T _g , 0 - 20°C)	72 x 10 ⁻⁶ m/m °C
	TMA (T>T _g , 90 - 150°C)	160 x 10 ⁻⁶ m/m °C
Transição vítrea (T _g)	DMA, E"	66 - 87 °C

Para aplicações estereolitográficas, os sistemas foto-polimerizáveis devem possuir as seguintes características (Fouassier, 1995; Bártolo, 2001; Bártolo e Mateus, 2003):

- Elevada reactividade sob irradiação.
- Viscosidade controlada.
- Baixa volatilidade.
- Baixa toxicidade.
- Baixa contracção.
- Elevado grau de cura.
- Boas propriedades mecânicas quando curados.

Em estereolitografia a cura dos sistemas poliméricos ocorre através de reacções de polimerização catiónica (resinas epoxídicas), polimerização radicalar (resinas acrílicas) e combinação de processos (sistemas poliméricos híbridos). As principais vantagens e desvantagens de cada um destes mecanismos são indicadas na Tabela 3.2. A energia necessária ao início do processo de polimerização é fornecida por radiação ultra-violeta (estereolitografia convencional), radiação infravermelha (estereolitografia de CO₂) ou por combinação dos dois efeitos (estereo-termo-litografia).

Tabela 3. 2 - Vantagens e desvantagens dos mecanismos de polimerização catiónicos e por radicais livres

	Sistema Catiónico	Sistema Radicalar
Custo	Elevado	Baixo
Propriedades mecânicas	Boa	Baixas
Contracção	Baixa	Elevada
Eficiência energética	Má	Boa
Inibição da reacção	H ₂ O	O ₂

3.1.2.1 – Foto-polimerização por radicais livres

A foto-polimerização por radicais livres é uma reacção em cadeia que compreende três fases fundamentais (Figura 3.1) (Guillet, 1985; Olayan *et al.*, 1996; Fouassier, 1999):

- Iniciação.
- Propagação.
- Terminação.

Iniciação

A mistura de foto-iniciador e monómeros é exposta a uma fonte luz possuindo fotões com energia $h\nu$, sendo h a constante de Planck e ν a frequência da radiação (Gilbert e Baggot, 1991; Bártolo e Mitchell, 2003; Kai *et al.*, 2003; Noorani, 2006). Os foto-iniciadores absorvem alguns dos fotões luz, passando do seu estado fundamental para um estado excitado. Após excitação algumas das moléculas de foto-iniciador sofrem

fenómenos de foto-fragmentação (outras regressam simplesmente ao estado fundamental libertando a energia absorvida) gerando espécies reactivas (radicais livres – espécies iniciadoras possuindo electrões desemparelhados). Consequência da eficiência do processo de geração de radicais livres, que depende da concentração de iniciador, intensidade de radiação e temperatura, existe um período de tempo em que o número de espécies reactivas formadas não é suficiente para iniciar o processo de cura. Este período de tempo é designado por tempo de indução.

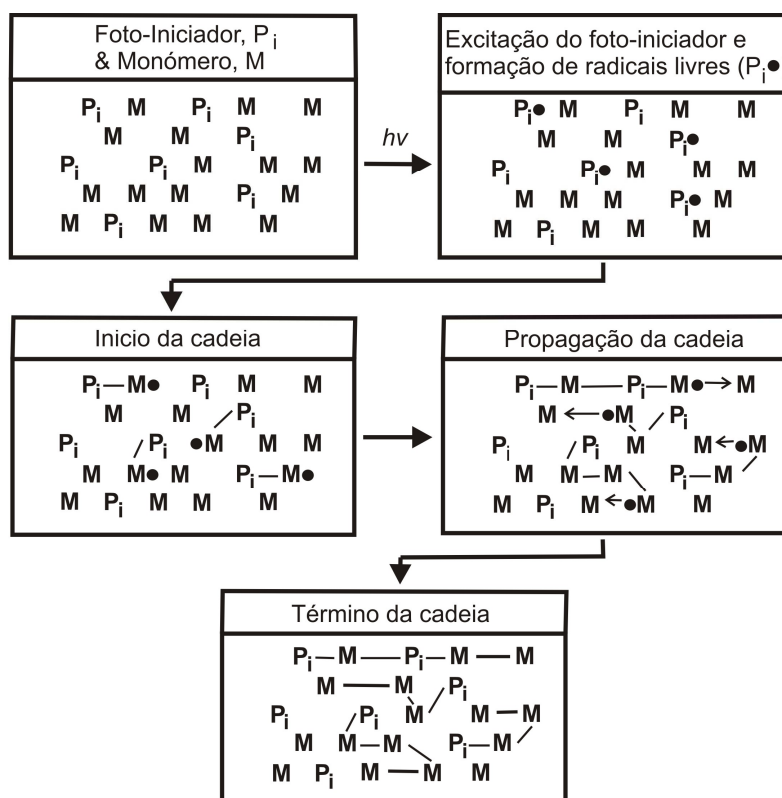


Figura 3. 1 - Representação simplificada da foto-polimerização por radicais livres (Kai *et al.*, 2003)

O tempo de indução resulta do facto de uma vez produzidas espécies reactivas estas poderem ser consumidas pelo oxigénio presente na mistura ou recombinarem-se de modo a formarem novamente a molécula de iniciador original, existindo assim um número reduzido de radicais para desencadear a cura. A minimização do tempo de indução (tempo não produtivo) está intimamente ligada à optimização da eficiência do processo de geração de radicais.

Após o período de indução, as espécies reactivas são suficientes para reagirem com as moléculas de pré-polímero formando radicais de maior dimensão, desencadeando assim o processo de cura.

Propagação

A fase de propagação corresponde à adição sucessiva de monómeros ou moléculas de pré-polímero. Esta etapa é caracterizada inicialmente por um aumento muito significativo da taxa de reacção (fenómeno de auto-aceleração) (Selli e Bellobono, 1993; Fouassier, 1995). Durante a fase de propagação verifica-se um aumento do peso molecular das cadeias poliméricas, um aumento da temperatura de transição vítrea e a uma melhoria das propriedades mecânicas.

Um importante fenómeno que caracteriza a fase de propagação é a **gelificação**, fenómeno irreversível que está associado à formação inicial de uma rede molecular polimérica, e ao aumento súbito e acentuado da viscosidade (Gillham, 1976, 1979; Kenny *et al.*, 1989; Prime 1997; Bártolo, 2001; Bártolo e Mitchell, 2003; Bártolo e Mateus, 2003; Bártolo, 2010). O aumento da viscosidade implica uma perda da capacidade da resina em fluir, ficando as cadeias moleculares aprisionadas, impedindo a aproximação das espécies reactivas e a continuação da propagação da reacção.

Terminação

Um importante fenómeno que ocorre em estereolitografia é a **vitrificação**, fenómeno que normalmente ocorre depois da gelificação, e consiste na formação de uma estrutura sólida devido ao aumento do peso molecular do polímero (Prime 1997; Bártolo, 2001; Bártolo, 2010). Este fenómeno, associado ao aumento de temperatura da transição vítrea do material, origina uma redução significativa da taxa de reacção, em resultado da limitação imposta à mobilidade das cadeias poliméricas (Bártolo, 2001; Bártolo e Mateus, 2003). A vitrificação corresponde à transição do estado líquido ou aborrachado ao estado vítreo e está associado à chamada terminação uni-molecular (Bártolo, 2001; Núñez *et al.*, 1998). É um processo reversível, que em regra implica o fornecimento adicional de energia através de uma operação de pós-cura (Bártolo, 2001; Núñez *et al.*, 2001).

A redução da mobilidade das cadeias poliméricas associada ao fenómeno de vitrificação é responsável por (Selli e Bellobono, 1993; Bártolo, 2001; Bártolo e Mateus, 2003):

- Percentagem de material curado que se obtêm após a fase de construção e consequentemente a extensão necessária de operações de pós-cura.
- Formação de estruturas heterogéneas.
- Afecta de modo negativo as propriedades e durabilidade do polímero curado.
- Provoca alterações do volume específico que contribuem para a geração de tensões internas.

Em aplicações estereolitográficas, é de fundamental importância definir correctamente o sistema polimérico. De modo a obter-se uma elevada percentagem de solidificação, reduzindo-se os efeitos do fenómeno de vitrificação prematura é necessário proceder-se do seguinte modo (Bártolo, 2001; Bártolo e Mitchell, 2003; Bártolo e Mateus, 2003; Gaspar e Bártolo, 2008; Bártolo e Gaspar, 2008):

- Aumento da concentração de foto-iniciador.
- Aumento da intensidade da radiação ultravioleta.

3.1.2.2 – Foto-polimerização cationica

A polimerização catiónica é um tipo de foto-polimerização em que é formado uma espécie iniciadora catiónica (catião) activado por calor ou por um ácido ou um alogeneto de alquilo. O catião quebra a ligação O-C e é atraído para o lado activo do átomo de oxigénio. Isto cria um lado activo do átomo C que se quer ligar a um átomo de oxigénio de outro “mero” quebrando a sua ligação O-C. Ocorre então a reacção de cadeia formando-se gradualmente uma rede polimérica altamente interconectada.

Como iniciadores da reacção de polimerização catiónica são utilizados ácidos protónicos fortes (H_2SO_4 , Cl_3OOH , etc.), ácidos de Lewis (BF_3 , AlCl_3 , etc.) ou alogenetos de alquilo ($(\text{C}_6\text{H}_5)_3\text{CCl}$) (Crivello e Dietliker, 1998; Noorani, 2006).

3.2 – Técnicas

3.2.1 – Sistema de estereolitografia

Os provetes utilizados neste estudo foram executados num equipamento estereolitográfico SLA250, da 3D Systems, cujas características estão indicadas na Tabela 3.3.

Tabela 3. 3 - Características do equipamento estereolitográfico SLA250 (Veltec, 2010)

Laser	
Laser	HeCd
Comprimento de onda	325 nm
Potência do laser	24 mW
Sistema de cura	
Processo	Sistema de cura Zephyr
Espessura mínima recomendada da camada	0.1mm (para as estratégias de varrimento ACES e QuickCast)
Sistema óptico e varrimento	
Diâmetro do feixe laser (diâmetro@1/e ²)	0.20 – 0.28 mm
Velocidade máxima de construção	762 mm/s
Elevador	
Resolução vertical	0.0025 mm
Peso máximo dos modelos	9.1 Kg
Capacidade da tina	
Volume	32.2 L
Dimensão máxima de volume de trabalho	250x250x250 mm

3.2.2 – Análise mecânica-dinâmica (DMA)

3.2.2.1 – Equipamento DMA

As propriedades macroscópicas dos materiais, tais como as propriedades mecânicas, relaxações moleculares associadas a mudanças de forma e deformações microscópicas geradas devido a rearranjos moleculares, podem ser avaliadas através de análises dinâmico-mecânicas (DMA) ou termo-dinâmico-mecânicas (DMTA) (Cassu e Felisbeti, 2005).

A avaliação das propriedades mecânicas decorre da monitorização da resposta do material, na forma de tensão, quando solicitado por uma deformação, ou na forma de deformação, quando solicitado por uma tensão. Estes ensaios são destrutivos e realizados a tensões ou deformações constantes, ou a taxas constantes (Cassu e Felisbeti, 2005).

Nos ensaios dinâmico-mecânicos, a amostras sólidas ou de líquido viscoso, é aplicada uma tensão ou deformação mecânica oscilatória sinusoidal de baixa amplitude, e medida a deformação ou tensão resultante. Neste tipo de ensaios, pode variar-se a frequência e a temperatura (Cassu e Felisbeti, 2005).

Neste trabalho de investigação utilizou-se o sistema Tritec 2000 (Triton Technology, Reino Unido) (Figura 3.2) para a avaliação do efeito da posição de cura do provete na plataforma de construção, do espaçamento entre linhas de varrimento e do efeito da humidade em termos das propriedades mecânicas e da variação da temperatura de transição vítrea. As principais características deste equipamento estão indicadas na Tabela 3.4.



Figura 3. 2 - Equipamento DMA Tritec 2000 (Veltec, 2010)

Tabela 3. 4 - Características do equipamento DMA Tritec 2000 (Veltec, 2010)

Variação da temperatura	Utilizando o forno radiante, permite temperaturas entre -190°C e 400°C.
Variação da frequência	Frequências dinâmicas desde 0Hz até 600Hz com pequenos incrementos. Durante um ensaio, dependendo do comportamento do material, podem ser usadas até 100 frequências diferentes.
Variação da rigidez	Permite obter variações de rigidez superiores a 5 ordens de magnitude.
Modos de teste permitidos	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Single Cantilever Bending ▪ Dual Cantilever Bending ▪ Three Point Bending ▪ Corte ▪ Tracção simples ▪ Compressão

3.2.2.2 – Princípios teóricos

Os materiais são classificados em função da resposta que dão a estímulos mecânicos. No caso dos sólidos perfeitamente elásticos ou sólidos de Hooke, existe uma relação de proporcionalidade entre a tensão aplicada e a deformação obtida, de acordo com a lei de Hooke. No caso de materiais viscosos ideais, que obedecem à lei de Newton, a tensão e a taxa de deformação estão relacionadas através de uma característica intrínseca que é a viscosidade. Existem ainda outros materiais, como é o caso dos materiais poliméricos, que possuem um comportamento intermédio entre o elástico e o viscoso, e que são denominados viscoelásticos. A contribuição elástica e viscosa para o comportamento mecânico do polímero está dependente da temperatura e da escala de tempo do ensaio (Cassu e Felisbeti, 2005).

Quando a uma amostra viscoelástica é aplicada uma tensão constante de corte, σ_1 , observa-se uma deformação, $\gamma_1(t)$. Sendo permitido a amostra recuperar, é depois aplicada uma nova tensão constante de corte, σ_2 , superior a σ_1 , e observa-se uma deformação $\gamma_2(t)$. Quer $\gamma_1(t)$, quer $\gamma_2(t)$ são dependentes do tempo (Figura 3.3a e 3.3b). Se a deformação for visualizada graficamente como função da tensão, num determinado

instante, t_a , após a aplicação da tensão, observa-se que $\gamma(t_a)$ aumenta linearmente e é proporcional à tensão aplicada (Figura 3.3c). Para um instante superior, t_b , após a aplicação da tensão, a deformação $\gamma(t_b)$ também aumentará linearmente com a tensão. Assim, para um determinado instante t , se as deformações associadas às tensões aplicadas (σ_1 e σ_2) forem $\gamma_1(t)$ e $\gamma_2(t)$, então,

$$\frac{\gamma_1(t)}{\sigma_1} = \frac{\gamma_2(t)}{\sigma_2} \quad (3.1)$$

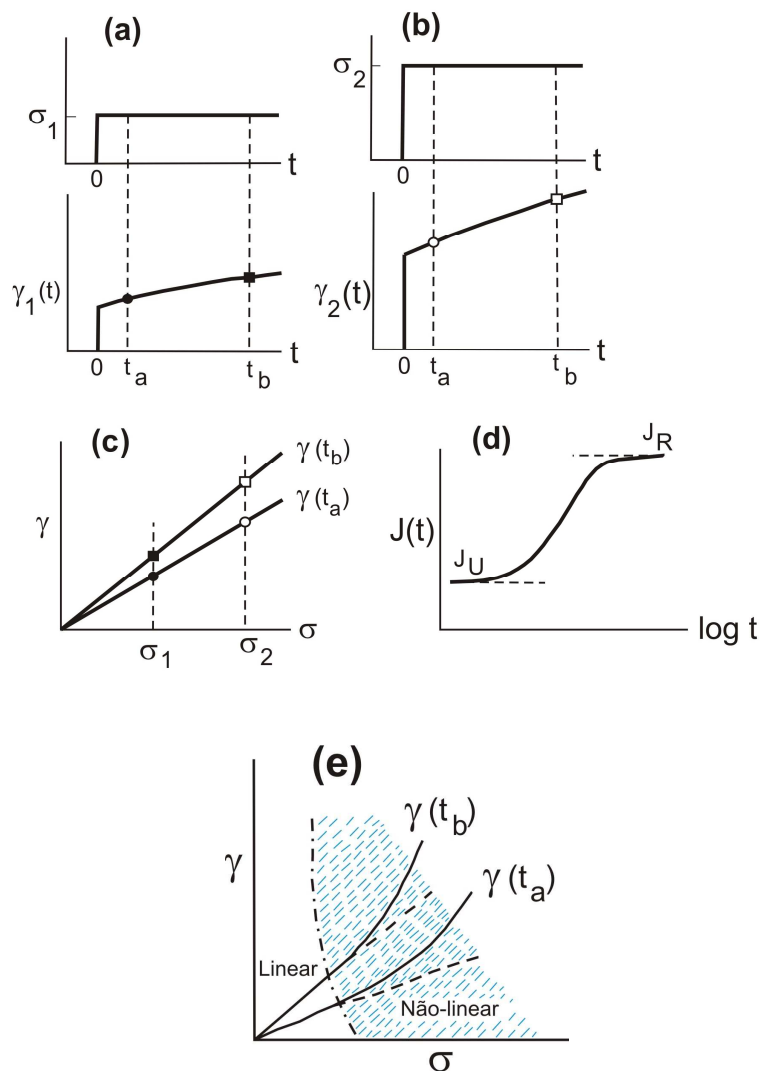


Figura 3. 3 - Viscoelasticidade linear em ensaios de fluência: (a) uma tensão constante, σ_1 , no instante $t=0$ conduz a uma deformação, $\gamma_1(t)$ dependente do tempo; (b) uma tensão de valor superior, σ_2 aplicada no instante $t=0$ conduz a uma deformação $\gamma_2(t)$ dependente do tempo; (c) deformação linear, $\gamma(t_a)$ e $\gamma(t_b)$, nos instantes, t_a e t_b , causada pela tensão σ_1 e σ_2 , respectivamente; (d) dependência de $J(t)$ com o log do tempo durante uma relaxação completa, de acordo com a equação (3.4). J_{nr} é a complacência para um

sistema não relaxado e J_r é a complacência para um sistema relaxado; (e) regiões de deformação linear e não-linear nos instantes t_a , $\gamma(t_a)$ e t_b , $\gamma(t_b)$ (McCrum *et al.*, 1997)

Como a deformação nas duas experiências, no mesmo instante t , é proporcional às tensões impostas, é possível definir a **complacência** do material, $J(t)$, no instante t através da seguinte equação (McCrum *et al.*, 1997):

$$J(t) = \frac{\gamma_1(t)}{\sigma_1} = \frac{\gamma_2(t)}{\sigma_2} \quad (3.2)$$

ou em termos gerais,

$$J(t) = \frac{\gamma(t)}{\sigma} \quad (3.3)$$

Na Figura 3.3e são indicadas as regiões de viscoelasticidade linear e não linear na curva de deformação em função da tensão. Na região de viscoelasticidade linear é fácil determinar a variação da deformação. A complacência $J(t)$ nesta região é independente da tensão aplicada, sendo o seu valor para o instante t , numa experiência de fluência, exactamente o mesmo, quer a tensão seja σ_1 , σ_2 ou alguma outra tensão σ arbitrária (McCrum *et al.*, 1997).

Nos testes realizados na região de viscoelasticidade não-linear, cada valor de tensão conduz a uma deformação dependente do tempo (McCrum *et al.*, 1997).

Como alternativa ao ensaio de fluência, podem realizar-se ensaios de relaxação de tensões. Neste caso, é aplicada uma deformação de corte, γ_1 , no instante $t=0$, e tem que se observar uma tensão $\sigma_1(t)$ de modo a manter-se γ_1 constante. À amostra é permitido recuperar e depois é aplicada uma segunda deformação γ_2 superior à inicial. Os valores de $\sigma_1(t)$ e $\sigma_2(t)$ diminuem com o tempo (ver Figura 3.4a e 3.4b). A baixas deformações verifica-se que a tensão aumenta linearmente, como indicado na Figura 3.4c. Deste modo, para um tempo arbitrário t , obtêm-se a seguinte relação:

$$\frac{\sigma_1(t)}{\gamma_1} = \frac{\sigma_2(t)}{\gamma_2} \quad (3.4)$$

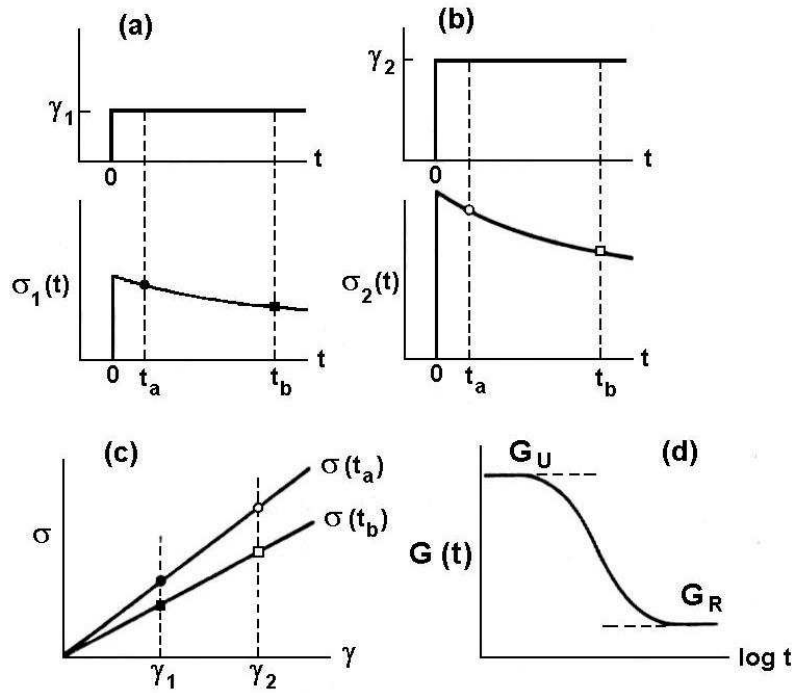


Figura 3. 4 - Viscoelasticidade linear em ensaios de relaxação de tensões (linear viscoelastic stress relaxation): (a) deformação constante γ_1 aplicada no instante $t=0$ conduz a tensão dependente do tempo $\sigma_1(t)$; (b) uma deformação de valor superior γ_2 aplicada no instante $t=0$ conduz a tensão dependente do tempo $\sigma_2(t)$; (c) tensão linear, σ_1 e σ_2 , nos instantes, t_a e t_b , causada pela deformação $\gamma(t_a)$ e $\gamma(t_b)$, respectivamente; (d) dependência $G(t)$ com o log do tempo durante uma relaxação completa. G_U é o módulo para um sistema não relaxado e G_R é o módulo para um sistema relaxado (McCrum *et al.*, 1997)

No instante t , as tensões nos dois testes são proporcionais às deformações impostas. Deste modo é possível definir-se o módulo de relaxação de tensões no instante t de acordo com a seguinte equação:

$$G(t) = \frac{\sigma(t)}{\gamma} \quad (3.5)$$

Se $G(t)$ for medido ao longo de várias décadas de tempo e for visualizado num gráfico $G(t)$ versus logaritmo t , a sua curva tem a forma sigmoidal como mostrado na Figura 3.4d. Se as medições forem realizadas durante poucas décadas de tempo, somente uma parte da sigmoide é visualizada. Para períodos de tempo muito pequenos ou muitos longos, $G(t)$ tende para os valores limite G_U e G_R . Nestas regiões extremas, o corte começa a ser cada vez mais elástico, independentemente do tempo.

3.2.2.2.1 – Ensaio dinâmico-mecânico

Nos materiais viscoelásticos, as componentes elástica e viscosa podem ser separadas, quer em função da temperatura, quer em função do tempo (Cassu e Felisbeti, 2005). Os ensaios podem ser realizados no modo de oscilação forçada (ver Figura 3.5a) e no modo de oscilação livre (ver Figura 3.5b). No modo de oscilação forçada, é imposta ao material uma determinada amplitude constante durante todo o ensaio, variando a temperatura ou a frequência (Cassu e Felisbeti, 2005).

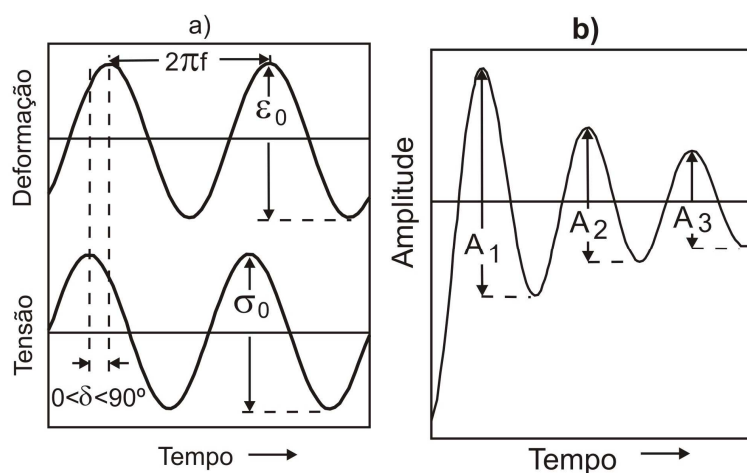


Figura 3.5 - Material viscoelástico submetido a um ensaio dinâmico-mecânico em diferentes modos. (a) Oscilação forçada; (b) Oscilação livre (Cassu e Felisbeti, 2005)

No caso de ensaios de fluência, aplica-se uma tensão constante sinusoidal a um provete com geometria bem definida, obtendo-se a correspondente deformação sinusoidal em função do tempo (Menard, 2003; Wetton, 1998). A tensão aplicada é definida por meio da seguinte equação:

$$\sigma(t) = \sigma_0 \sin(\omega t) \quad (3.6)$$

onde σ é a tensão no instante t , σ_0 é a tensão máxima (amplitude máxima), ω é a frequência angular da tensão oscilatória e t o tempo. A forma da onda da deformação resultante irá depender do comportamento viscoso e elástico do provete (Menard, 2003).

A resposta à tensão sinusoidal é uma deformação sinusoidal, ϵ , dada por meio da seguinte equação:

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \sin(\omega t + \delta) \quad (3.7)$$

onde δ é o **ângulo de fase** e representa o atraso entre a tensão e a deformação máxima, e ϵ_0 é a deformação máxima (amplitude máxima) (Figura 3.6).

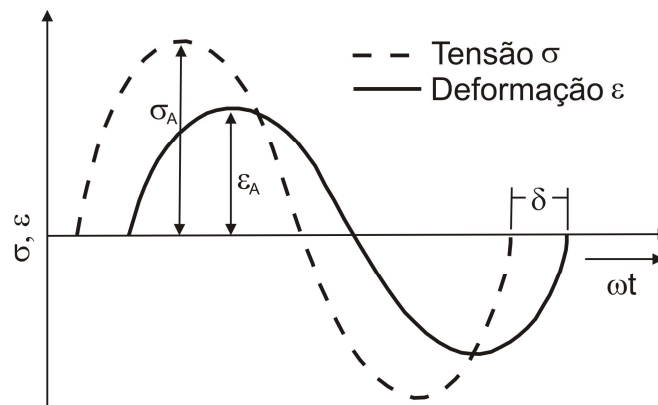


Figura 3. 6 - Tensão sinusoidal e correspondente deformação para um material viscoelástico linear (Ehrenstein *et al.*, 2004)

Rescrevendo-se a equação (3.7), obtém-se,

$$\epsilon(t) = \epsilon_0 \sin(\omega t) \cos \delta + \delta_0 \cos(\omega t) \sin \delta \quad (3.8)$$

Para um material ser totalmente elástico, a tensão tem que estar em fase com a deformação (ver Figura 3.7b) e para ser totalmente viscoso a tensão tem que estar desfasada 90° da deformação (ver Figura 3.7c). No caso dos materiais viscoelásticos o desfasamento entre tensão e deformação situa-se ente 0 e 90° . Os materiais poliméricos podem apresentar um comportamento mais ou menos viscoelásticos consoante estão abaixo ou acima da temperatura de transição vítrea (T_g) (Cassu e Felisbeti, 2005; Perkin Elmer, 2009; Wetton, 1998).

No caso de materiais perfeitamente elásticos, onde a tensão aplicada e a deformação gerada estão em fase (o ângulo de fase, δ , tem o valor de zero), a equação (3.8) transforma-se em:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \sin(\omega t) \quad (3.9)$$

Para o caso de materiais perfeitamente viscosos em que o ângulo de fase toma o valor de 90° (ver Figura 37c), tem-se que:

$$\varepsilon(t) = \varepsilon_0 \cos(\omega t) \quad (3.10)$$

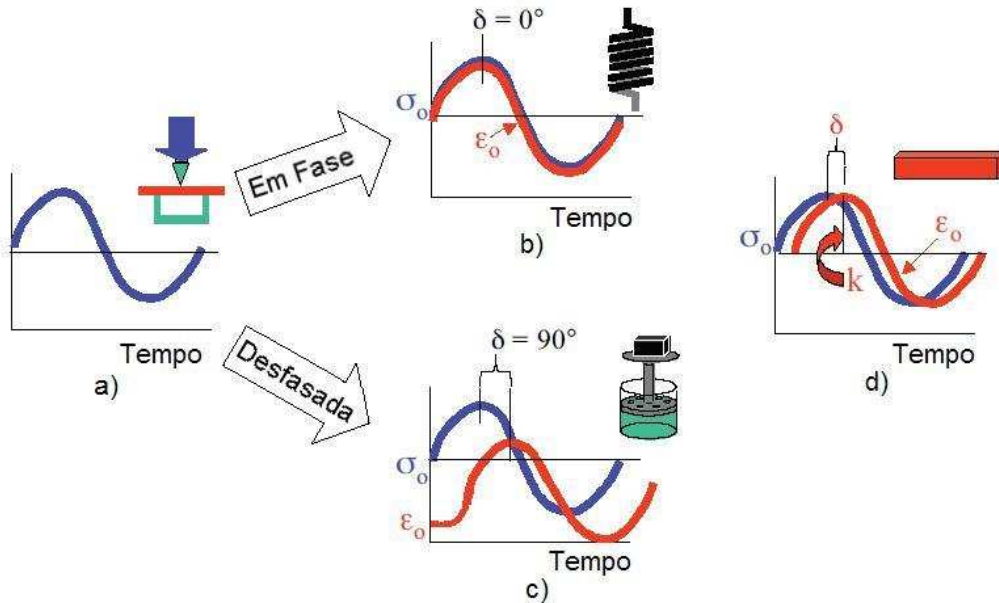


Figura 3. 7 - Variação sinusoidal da tensão e da deformação numa experiência mecânica dinâmica (Perkin Elmer, 2009)

A partir das equações (3.6) e (3.7) é possível obterem-se os módulos úteis, E' e G' de acordo com as seguintes equações (Cassu e Felisbeti, 2005):

$$E' = (\sigma_0 / \varepsilon_0) \cos \delta = E^* \cdot \cos \delta \quad (3.11)$$

$$G' = (\sigma_0 / \varepsilon_0) \cos \delta = G^* \cdot \cos \delta \quad (3.12)$$

onde E' é o módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young obtido em ensaios em que os provetes são submetidos a estímulos unidireccionais (tracção e compressão), e G' é o módulo de elasticidade transversal (Cassu e Felisbeti, 2005).

Devido à introdução de uma relação de fase entre a tensão e a deformação, os módulos tornaram-se quantidades complexas. Deste modo numa resposta viscoelástica é conveniente distinguir uma componente elástica em fase definida como **módulo útil** (G' ou E') e uma componente viscosa fora de fase definida como **módulo de perda** (G'' ou E'') (Wetton, 1998). O módulo útil, E' , de acordo com a norma ISO 6721-1 representa a rigidez dos materiais viscoelásticos e é proporcional à energia armazenada durante o ciclo de carga (Ehrenstein *et al.*, 2004). O módulo de perda, E'' de acordo com a norma ISO 6721-1 é definido como sendo proporcional à energia dissipada durante um ciclo de carga. Os módulos de perda definem-se de acordo com as seguintes equações (Cassu e Felisbeti, 2005):

$$E'' = (\sigma_0 / \varepsilon_0) \sin \delta = E^* \cdot \sin \delta \quad (3.13)$$

$$G'' = (\sigma_0 / \varepsilon_0) \sin \delta = G^* \cdot \sin \delta \quad (3.14)$$

De acordo com a representação complexa antes mencionada é possível definir os módulos complexos, E^* e G^* , através das seguintes equações (Ehrenstein *et al.*, 2004):

$$E^* = E' + i E'' \quad (3.15)$$

$$G^* = G' + i G'' \quad (3.16)$$

O diagrama de Argand indicado na Figura 3.8 representa graficamente a relação entre E' (parte real) e E'' (parte imaginária) e o ângulo de fase, δ (Ehrenstein *et al.*, 2004; Wetton, 1998). A parte real do módulo pode ser usada para avaliar as propriedades elásticas e a parte imaginária para as propriedades viscoelásticas (Ehrenstein *et al.*, 2004). O módulo perdido (E'') descreve as características viscosas do polímero, correspondendo assim à porção do material que flui quando submetida a condições de tensão. Este comportamento é característico da fluência, que envolve a aplicação de uma tensão constante variando a deformação com o tempo ou da relaxação de tensões que envolve a aplicação de uma deformação constante sob tensão a variar no tempo (Sepe, 1998). O ângulo de fase, também designado por factor de perda, é definido como:

$$\frac{E''}{E'} = \frac{E^* \sin \delta}{E^* \cos \delta} = \tan \delta \quad (3.17)$$

A relação anterior é igualmente válida para ensaios de corte envolvendo G^* , G' e G'' (Cassu e Felisbeti, 2005; Ehrenstein *et al.*, 2004; Wetton, 1998). De um modo simplista, pode considerar-se $\tan \delta$ (parâmetro adimensional) como um índice de viscoelasticidade (Sepe, 1998).

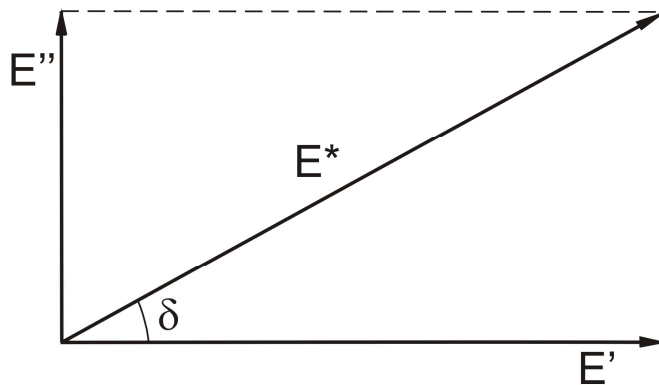


Figura 3. 8 - Diagrama de Argand ilustrando a relação entre E^* , E' e E'' (Wetton, 1998)

Os módulos E' e E'' podem ainda ser determinados de acordo com as seguintes equações:

$$E' = (\sigma_0 / \varepsilon_0) \cos \delta = (f_0 / bk) \cos \delta \quad (3.18)$$

$$E'' = (\sigma_0 / \varepsilon_0) \sin \delta = (f_0 / bk) \sin \delta \quad (3.19)$$

onde δ é o ângulo de fase, b é um termo que depende da geometria do provete, f_0 é a força máxima aplicada e k é o deslocamento máximo.

3.2.2.5 – Temperaturas de transição

O volume livre de um polímero é definido como o espaço livre que uma molécula tem para desenvolver os seus movimentos internos. O aumento do volume livre resulta

do aumento da energia absorvida pelas cadeias poliméricas. As variações de volume livre (ou de tempos de relaxamento) servem para descrever as transições térmicas de polímeros indicadas na Figura 3.9 (Menard, 2003).

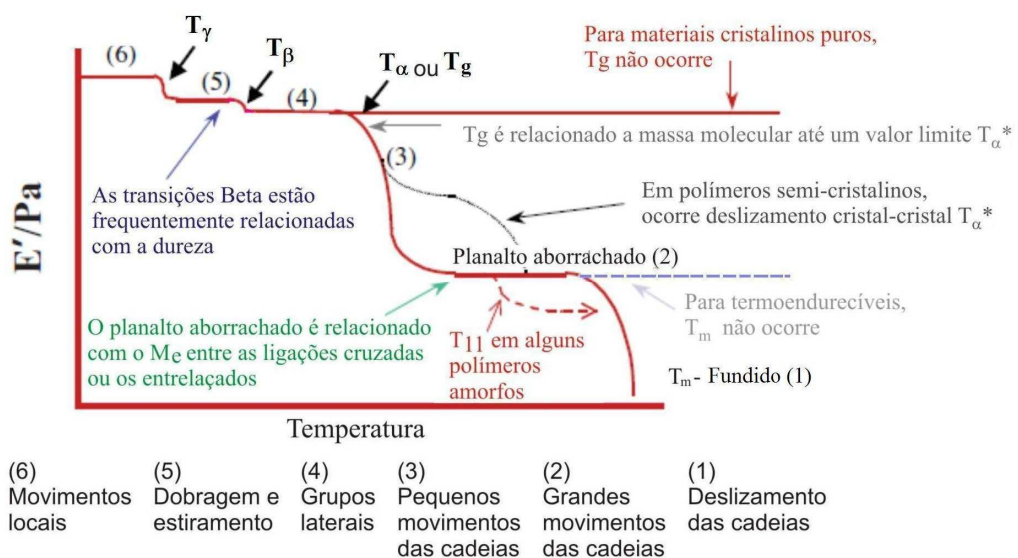


Figura 3. 9 - Transições térmicas num material polimérico. Partindo de condições de operação a baixas temperaturas, o módulo diminui à medida que as moléculas ganham espaço livre, resultando em maior movimentação molecular. A curva principal compreende seis distintas regiões que correspondem a: movimentos locais (6), flexão e estiramento (5), movimentos das cadeias laterais (4), transição vítrea, T_g (3), movimentos coordenados na parte amorfa (2) e fundido polimérico (1) (Menard, 2003; Perkin Elmer, 2009)

De acordo com a Figura 3.9, à medida que a temperatura aumenta e o material se expande, o volume livre aumenta, podendo ocorrer movimentos das uniões localizadas (dobragem e estiramento) e das cadeias laterais. A esta transição chama-se **transição gama** (T_γ) (Menard, 2003). Continuando a aumentar a temperatura e consequentemente o volume livre, as cadeias laterais começam a ter mais espaço para se movimentar e o material começa a desenvolver alguma dureza, sendo esta transição, conhecida como **transição beta** (T_β). Esta transição pode ser considerada como “barreira de activação”, devido a corresponder à energia de activação necessária às transições seguintes: reacções no estado sólido, deformações, fluxo ou fluência, amortecimento acústico, mudanças físicas por envelhecimento, e difusão de gás dentro do polímero. De um modo genérico a transição β está relacionada com um movimento localizado na cadeia

principal ou com um movimento muito grande das cadeias laterais permitindo a absorção de bastante energia (Menard, 2003).

Com o aumento da temperatura e o respectivo aumento do volume livre as cadeias poliméricas das regiões amorfas começam a possuir amplos movimentos. Esta transição designa-se por **transição vítrea** (T_g) e indica a temperatura de passagem do estado vítreo para o estado “maleável”, sem que exista uma mudança estrutural do polímero. A temperatura de transição vítrea é determinada pela parte amorfa da matéria, pelo que quanto mais cristalino for o material, menor será a temperatura de transição vítrea.

Para muitos polímeros, T_g representa a principal transição. Esta transição define o limite superior do intervalo de temperatura acima do qual o polímero não pode ser usado. Quando se pretende ter resistência e rigidez, normalmente usa-se o limite superior. Em borrachas e materiais semi-cristalinos, tais como polietileno ou polipropileno, é usado o limite inferior. Mudanças na temperatura de T_g são usadas normalmente para monitorizar as mudanças no polímero, tais como a plasticização por solventes presentes no meio ambiente ou o aumento das ligações cruzadas provocado quer por envelhecimento térmico, que por reacções de cura quer por incidência de radiação ultra-violeta (Bártolo, 2001; Menard, 2003).

A técnica DMA é uma das mais adequadas para a determinação da temperatura de transição vítrea, existindo três pontos comumente usados no seu cálculo:

- O pico ou início da curva $\tan \delta$.
- O início da queda de E' .
- O início ou pico da curva E'' .

A área acima de T_g e abaixo da fusão existe uma região caracterizada por um elevado nível de entrelaçamento entre cadeias poliméricas ou, no caso de termoendurecíveis, por um elevado nível de ligações cruzadas. Nesta região as propriedades mecânicas são proporcionais quer ao número de ligações cruzadas quer ao comprimento das cadeias entre os entrelaçados (Menard, 2003).

Prosseguindo o aquecimento, o material acaba por fundir-se. A temperatura correspondente designa-se por **temperatura de fusão** (T_m) e está associada à destruição da zona cristalina. Quando se atinge o ponto de fusão, o volume livre aumenta de modo a que as cadeias consigam deslizar umas sobre outras. No estado fundido, a capacidade para fluir é dependente do peso molecular do polímero.

3.2.2.4 – Variação do módulo útil e $\tan \delta$ para os diversos tipos de materiais poliméricos

A variação do módulo útil em função da temperatura para termoplásticos amorfos e semi-cristalinos e termoendurecíveis é indicada na Figura 3.10. Através desta figura facilmente se visualiza que acima da temperatura de transição vítrea existem relações entre o módulo útil e a estrutura polimérica que podem afectar directamente o desempenho do produto plástico (Sepe, 1998). Nos termoplásticos amorfos o módulo aumenta com o peso molecular, no caso de materiais semi-cristalinos o módulo acima da transição vítrea aumenta com o grau de cristalinidade e no caso de polímeros termoendurecíveis, o módulo acima da transição vítrea aumenta com o grau de reticulações (Sepe 1998; Bártolo, 2001).

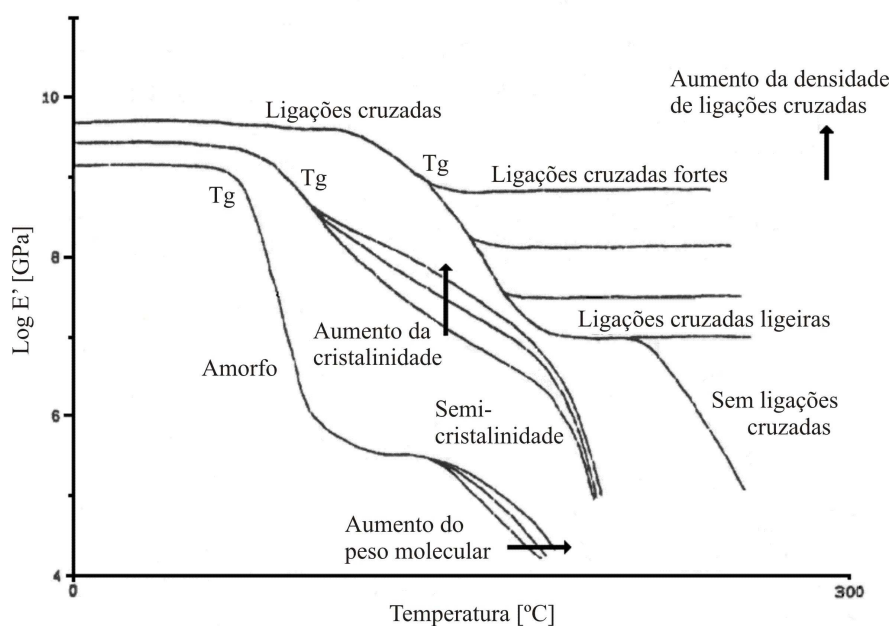


Figura 3. 10 - Variação do módulo útil em função da temperatura para polímeros amorfos, semi-cristalinos e com ligações cruzadas (Sepe, 1998)

Nos sólidos poliméricos, quando o material está abaixo da temperatura de transição vítrea, $\tan \delta$ é tipicamente inferior a 0.1 e frequentemente inferior a 0.03, mas durante a transição, o módulo perdido e $\tan \delta$ aumentam à medida que o módulo útil vai diminuindo. Abaixo da temperatura de transição vítrea, o rápido aumento do módulo perdido indica um aumento da mobilidade estrutural do polímero, correspondendo a um processo de relaxação que permite o movimento em extensas partes das cadeias individuais do polímero.

No caso de um polímero amorfo, em que o seu módulo útil é reduzido a 99%, quando passa a transição vítrea, o pico de $\tan \delta$ tem valores superiores a 1,0 e frequentemente acima de 2,0. Nestas condições, o material é macio e flexível (Sepe, 1998).

Nos termoplásticos semi-cristalinos não aditivados, onde tipicamente a diminuição dos valores do módulo é de 60 a 90%, $\tan \delta$ varia entre 0,1 e 0,2, sendo estes valores menores em cerca de uma ordem de magnitude em relação aos de um sistema completamente amorfo. Apesar de a mobilidade molecular aumentar, as cadeias cristalinas mantêm elasticidade suficiente para aplicações estruturais (Sepe, 1998).

4 – RESULTADOS EXPERIMENTAIS

4.1 – Introdução

O objectivo central deste trabalho de investigação consiste em avaliar o efeito de alguns parâmetros de processamento e condições de operação (humidade) sobre as propriedades mecânicas dos modelos produzidos. Os seguintes casos foram objecto de estudo:

- Caso I: Efeito da posição de construção na plataforma.
- Caso II: Efeito da variação do espaçamento entre linhas de varrimento (*hatch spacing*).
- Caso III: Efeito da influência da humidade nas propriedades mecânicas.

Para a análise experimental foram produzidos 36 provetes com 8 mm de largura, 2 mm de espessura e com 30 mm de comprimento (para efeitos de cálculo, foi considerado o comprimento útil do provete (10 mm), que corresponde à distancia entre os grampos do sistema DMD utilizado – ver Capitulo 3). Cada provete foi produzido em resina *Accura 45HC plastic*, da 3D Systems, utilizando-se camadas de 0.1mm de espessura. Dezoito provetes foram produzidos na posição vertical e dezoito na posição horizontal. Para a produção dos provetes utilizaram-se ainda os seguintes parâmetros, que constituem também variáveis de estudo:

- Distância de varrimento: 0.025 ou 0.15 mm.
- Profundidade de cura: 0.1, 0.225 e 0.5 mm

Metade dos provetes obtidos para cada condição de processo foram submetidos a uma operação de pós-cura durante 15 minutos numa câmara possuindo lâmpadas de ultravioleta irradiando entre 300 – 460 nm com um pico de 360 nm.

Para fácil identificação, os provetes utilizados foram numerados neste trabalho conforme se indica na Figura 4.1 e na Tabela 4.1.

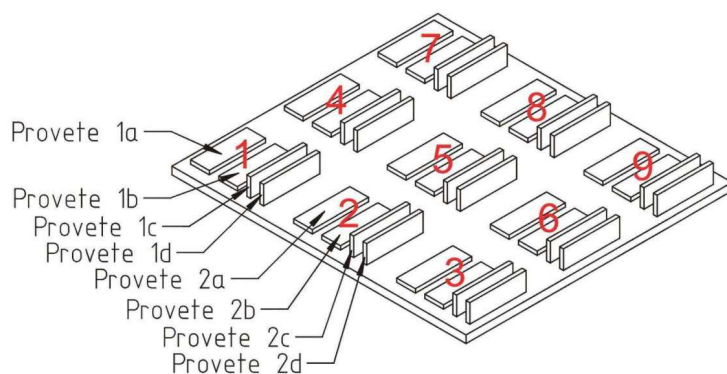


Figura 4. 1 - Numeração para identificação dos provetes

Tabela 4. 1 - Matriz com a identificação das diferentes variáveis a que cada provete foi submetido (dimensões em mm)

	Distância de Varrimento	Profundidade de Cura	Pós-Cura	Posição	
				Horizontal	Vertical
Provete 1a	0,025	0,1	✓	✓	
Provete 1b	0,025	0,1		✓	
Provete 1c	0,025	0,1	✓		✓
Provete 1d	0,025	0,1			✓
Provete 2a	0,025	0,5	✓	✓	
Provete 2b	0,025	0,5		✓	
Provete 2c	0,025	0,5	✓		✓
Provete 2d	0,025	0,5			✓
Provete 3a	0,025	0,225	✓	✓	
Provete 3b	0,025	0,225		✓	
Provete 3c	0,025	0,225	✓		✓
Provete 3d	0,025	0,225			✓
Provete 4a	0,15	0,1	✓	✓	
Provete 4b	0,15	0,1		✓	
Provete 4c	0,15	0,1	✓		✓
Provete 4d	0,15	0,1			✓
Provete 5a	0,15	0,5	✓	✓	
Provete 5b	0,15	0,5		✓	
Provete 5c	0,15	0,5	✓		✓
Provete 5d	0,15	0,5			✓
Provete 6a	0,15	0,225	✓	✓	
Provete 6b	0,15	0,225		✓	
Provete 6c	0,15	0,225	✓		✓
Provete 6d	0,15	0,225			✓
Provete 7a	0,15	0,1	✓	✓	
Provete 7b	0,15	0,1		✓	
Provete 7c	0,15	0,1	✓		✓
Provete 7d	0,15	0,1			✓
Provete 8a	0,15	0,5	✓	✓	
Provete 8b	0,15	0,5		✓	
Provete 8c	0,15	0,5	✓		✓
Provete 8d	0,15	0,5			✓
Provete 9a	0,15	0,225	✓	✓	
Provete 9b	0,15	0,225		✓	
Provete 9c	0,15	0,225	✓		✓
Provete 9d	0,15	0,225			✓

Não tendo havido qualquer compensação do diâmetro do feixe laser, nem tido em conta as variações dimensionais decorrentes da contracção, ou efeitos de condução de calor que possa induzir uma cura em regiões adjacentes, as dimensões dos provetes obtidos não foram, tal como esperado, iguais às definidas em ambiente CAD (Tabela 4.2).

Tabela 4. 2 - Matriz com as dimensões de cada provete (dimensões em mm)

	Espessura	Largura	Comprimento
Provete 1a	2,57	8,00	30
Provete 1b	2,53	8,02	30
Provete 1c	1,99	8,37	30
Provete 1d	2,00	8,35	30
Provete 2a	2,41	8,29	30
Provete 2b	2,40	8,20	30
Provete 2c	1,99	8,22	30
Provete 2d	2,00	8,24	30
Provete 3a	2,46	8,10	30
Provete 3b	2,41	8,12	30
Provete 3c	2,00	8,32	30
Provete 3d	2,00	8,32	30
Provete 4a	2,24	8,04	30
Provete 4b	2,28	8,04	30
Provete 4c	1,97	8,27	30
Provete 4d	1,96	8,23	30
Provete 5a	2,29	8,06	30
Provete 5b	2,30	8,05	30
Provete 5c	2,28	8,22	30
Provete 5d	2,09	8,18	30
Provete 6a	2,17	8,00	30
Provete 6b	2,18	8,03	30
Provete 6c	2,02	8,15	30
Provete 6d	2,02	8,14	30
Provete 7a	2,27	8,05	30
Provete 7b	2,26	8,04	30
Provete 7c	2,02	8,24	30
Provete 7d	2,01	8,23	30
Provete 8a	2,35	8,02	30
Provete 8b	2,35	8,05	30
Provete 8c	2,06	8,19	30
Provete 8d	2,00	8,20	30
Provete 9a	2,22	8,02	30
Provete 9b	2,20	8,03	30
Provete 9c	2,00	8,19	30
Provete 9d	1,99	8,19	30

Os valores de espessura e largura indicados na Tabela 4.3 correspondem ao valor médio de três medições. Os resultados indicados nesta tabela mostram que as dimensões dos provetes do grupo A são semelhantes às do grupo B (provetes construídos na

posição horizontal), e as dimensões dos provetes dos grupos C são semelhantes às do grupo D (provetes construídos na posição vertical).

Os ensaios foram realizados de acordo com as seguintes condições:

- Modo de ensaio: *Single canteliver bending*.
- Modo de vibração: Forçada (constante).
- Frequência: 1 Hz.
- Deslocamento: 0,05 mm.
- Rotina de aquecimento contínuo com uma taxa de 5,0 °C/min (início à temperatura ambiente).
- Temperatura de fim do teste: 110°C.

4.2 – Procedimento dos ensaios de humidade

Proвете 1A: O provete 1A uma vez produzido foi testado mecanicamente, em seguida foi colocado em água à temperatura ambiente durante três horas após o que foi limpo e novamente testado mecanicamente. Após este teste, foi novamente colocado em água durante mais três horas tendo-se em seguida repetido o processo.

provetes 1B e 1C: Os provetes 1B e 1C foram testados mecanicamente após terem sido produzidos, em seguida foram colocados em água à temperatura ambiente durante um dia (24 horas) após o que foram limpos e testados mecanicamente. Após este teste, foram colocados novamente em água durante mais um dia e novamente testados. Finalmente, foram colocados em água durante cinco dias, tendo-se repetido o processo de teste mecânico.

4.3 – Resultados experimentais

Nesta secção apresentam-se os resultados do trabalho experimental. Para a determinação da temperatura de transição vítrea, T_g foi utilizado o método do pico do módulo perdido (ver Capítulo 3). De notar ainda que nas diversas figuras apresentadas nesta secção R representa a distância do ponto ao centro da plataforma (por exemplo R7A é a distancia do centro do provete 7 ao centro da plataforma). Em função das condições de processamento os provetes obtidos foram classificados do seguinte modo:

Caso A: Posição de construção horizontal

Caso A1: Distância de varrimento 0.025 mm

Caso A11: Profundidade de cura: 0.100 mm

Caso A111: Com pós-cura

Caso A112: Sem pós-cura

Caso A12: Profundidade de cura: 0.500 mm

Caso A121: Com pós-cura

Caso A122: Sem pós-cura

Caso A13: Profundidade de cura: 0.225 mm

Caso A131: Com pós-cura

Caso A132: Sem pós-cura

Caso A2: Distância de varrimento 0.150 mm

Caso A21: Profundidade de cura: 0.100 mm

Caso A211: Com pós-cura

Caso A212: Sem pós-cura

Caso A22: Profundidade de cura: 0.500 mm

Caso A221: Com pós-cura

Caso A222: Sem pós-cura

Caso A23: Profundidade de cura: 0.225 mm

Caso A231: Com pós-cura

Caso A232: Sem pós-cura

Caso B: Posição de construção vertical

Caso B1: Distância de varrimento 0.025 mm

Caso B11: Profundidade de cura: 0.100 mm

Caso B111: Com pós-cura

Caso B112: Sem pós-cura

Caso B12: Profundidade de cura: 0.500 mm

Caso B121: Com pós-cura

Caso B122: Sem pós-cura

Caso B13: Profundidade de cura: 0.225 mm

Caso B131: Com pós-cura

Caso B132: Sem pós-cura

Caso B2: Distância de varrimento 0.150 mm

Caso B21: Profundidade de cura: 0.100 mm

Caso B211: Com pós-cura

Caso B212: Sem pós-cura

Caso B22: Profundidade de cura: 0.500 mm

Caso B221: Com pós-cura

Caso B222: Sem pós-cura

Caso B23: Profundidade de cura: 0.225 mm

Caso B231: Com pós-cura

Caso B232: Sem pós-cura

4.3.1 – Caso I: Efeito da posição de construção na plataforma

4.3.1.1 – Propriedades mecânicas

4.3.1.1.1 – Posição Horizontal

4.3.1.1.1.1 – Resultados

Para o estudo da influência da posição de construção na plataforma com provetes construídos na posição horizontal, consideraram-se os três seguintes casos:

- **Caso A211**

Para provetes construídos na posição horizontal, usando-se uma profundidade de cura de 0.1 mm, uma distância entre linhas de varrimento de 0.15 mm e operações de pós-cura, verifica-se que à temperatura ambiente o valor do módulo útil do provete diminui quando se aumenta a distância em relação ao centro da plataforma (Figura 4.2 e Tabela 4.3). Deste modo o provete 7A apresenta um módulo útil de 19.5 GPa ou seja cerca de 9% inferior ao módulo do provete 4A. Os testes mecânicos realizados, que permitem estabelecer a dependência das propriedades mecânicas com a temperatura, mostram também que as diferenças de propriedades mecânicas dos provetes construídos em zonas mais afastadas do centro da plataforma relativamente ao provetes construídos em zonas mais próximas diminui com a temperatura, atingindo valores similares no final do teste. Estas diferenças resultam de erros ópticos, fruto de distorções do foco laser e consequente diminuição da intensidade de radiação do centro da plataforma de construção para a periferia (Figura 4.3). A desfocagem aumenta as dimensões do “spot”

diminuindo a densidade de energia no plano de imagem. A densidade de energia pode ser compensada por um sistema dinâmico de modulação de potência (não existente) e pela velocidade de varrimento (estratégia não adotada). Deste modo, a cinética de polimerização é maior no centro da plataforma do que na periferia com consequências em termos de percentagem de material curado. Neste caso, o tempo de pós-cura utilizado (igual para todos os provetes) não foi suficiente para uniformizar a percentagem de material curado em ambos os provetes.

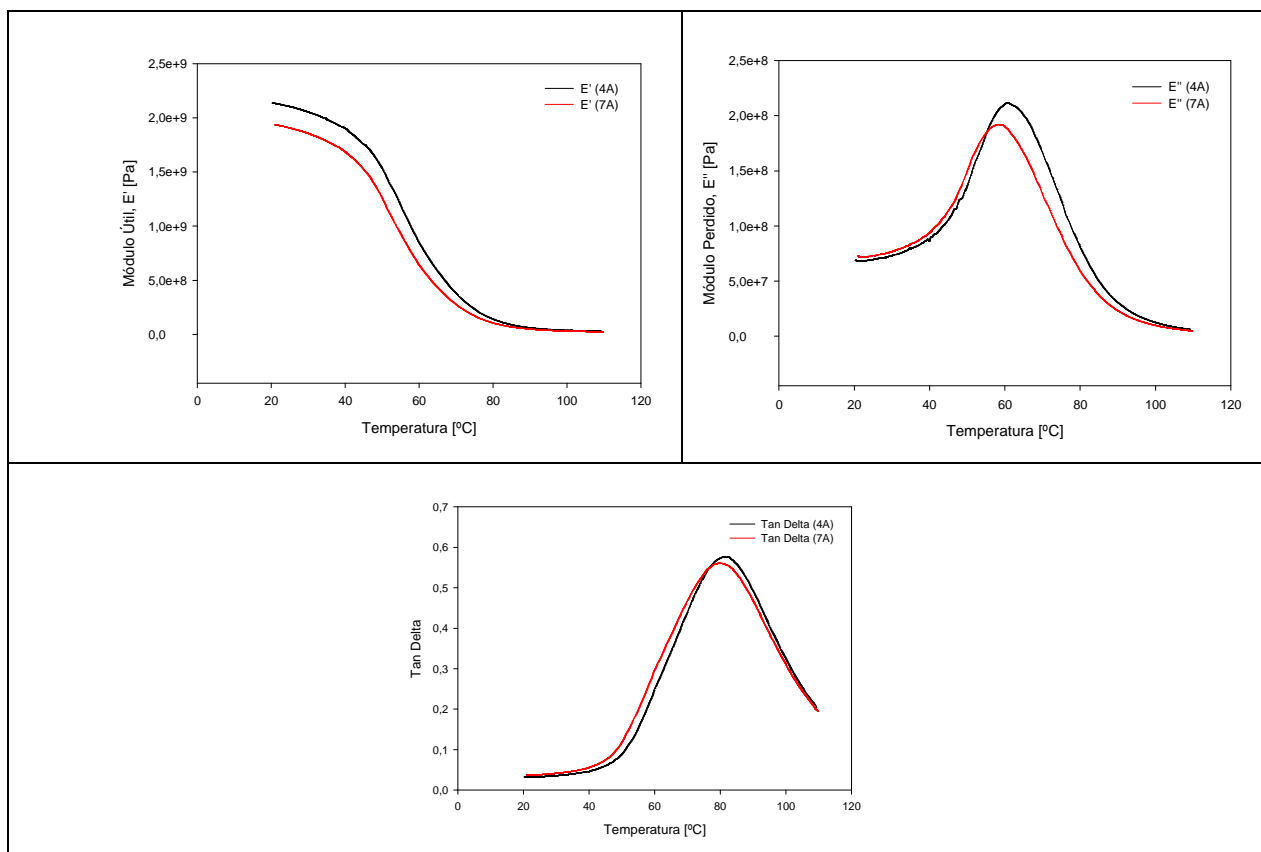


Figura 4. 2 - Caso A211: Influência da posição de construção na plataforma nos provetes 4A e 7A (R7A > R4A)

Tabela 4. 3 - Caso A211: Resultados obtidos para os provetes 4A e 7A (R7A > R4A)

			Posição			
			Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
Distancia Varrimento 0,15 Profundidade Cura 0,1 Com Pós-Cura Posição Horizontal	4A	Temp. [°C]	22,94	60,35	82,58	104,96
		E' [Pa]	2,12E+09	8,25E+08	1,10E+08	3,28E+07
		E'' [Pa]	6,83E+07	2,12E+08	6,31E+07	8,30E+06
		Tan Delta	0,0323	0,2565	0,5760	0,2527
	7A	Temp. [°C]	22,84	57,95	77,95	105,29
		E' [Pa]	1,92E+09	7,50E+08	1,27E+08	2,69E+07
		E'' [Pa]	7,17E+07	1,92E+08	7,09E+07	6,46E+06
		Tan Delta	0,0373	0,2560	0,5580	0,2405

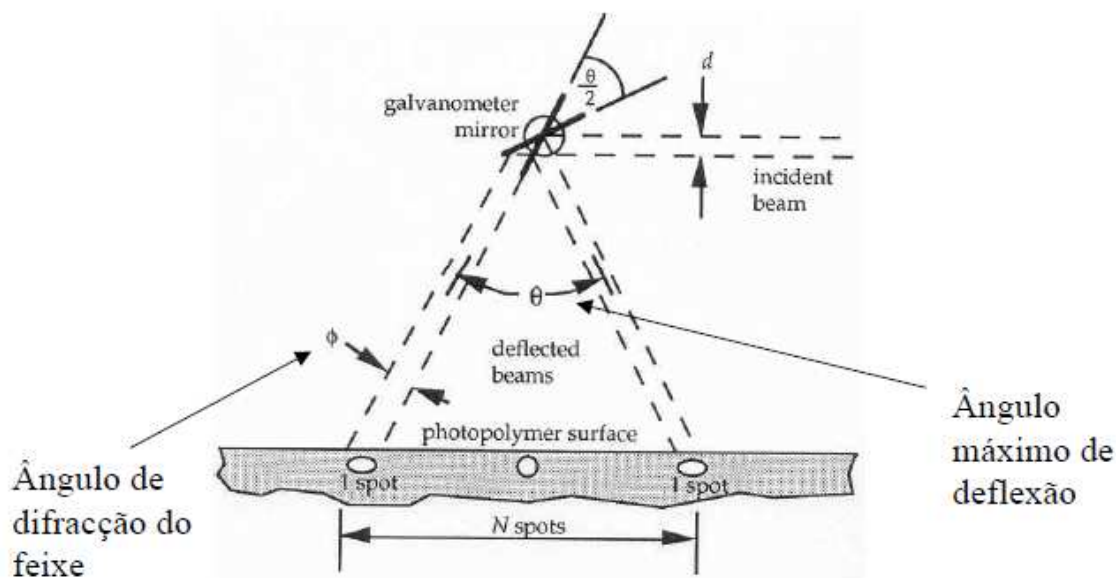


Figura 4. 3 - Deflexão do feixe luminoso

O provete 7A para valores de temperatura entre a temperatura ambiente e T_g , possui valores de módulo perdido (3.39 MPa) ligeiramente superiores (5%) aos do provete 4A, mas o seu valor máximo é cerca de 9% inferior. Entre T_g e a temperatura final do teste, os valores do módulo perdido do provete 7A são inferiores aos do provete 4A, mas vão-se aproximando até serem similares no final do teste. O grau de reticulação do provete 7A será ligeiramente inferior ao do provete 4A.

Entre a temperatura ambiente e a temperatura do pico de $\tan \delta$, o provete 7A possui valores ligeiramente superiores, e um pico também inferior. Até ao final do teste, a diferença entre valores vai diminuindo até ser praticamente nula.

• Caso A231

Para provetes construídos na posição horizontal, usando-se uma profundidade de cura de 0.225 mm, uma distância entre linhas de varrimento de 0.15 mm e operações de pós-cura, verificou-se que o valor do módulo útil é de início maior para o provete mais distante do centro da plataforma (proвете 9A) relativamente ao provete 6A, cerca de 13%. Contudo essa diferença tende a diminuir rapidamente até possuírem valores similares, aproximadamente por volta dos 50°C (Figura 4.4 e Tabela 4.4). O módulo

perdido do provete 9A à temperatura ambiente é igualmente superior ao do provete 6A. Esta diferença vai diminuindo até T_g , passando o provete a possuir um valor de módulo perdido ligeiramente inferior (-2.26%)). Entre T_g e aproximadamente os 80°C, a diferença entre os valores de módulo perdido mantém-se praticamente constante. Após os 80°C, até à temperatura final de teste, os valores obtidos por ambos os provetes são similares (Figura 4.4 e Tabela 4.4).

A variação de $\tan \delta$ entre os provetes 9A e 6A é semelhante ao observado para o caso A211.

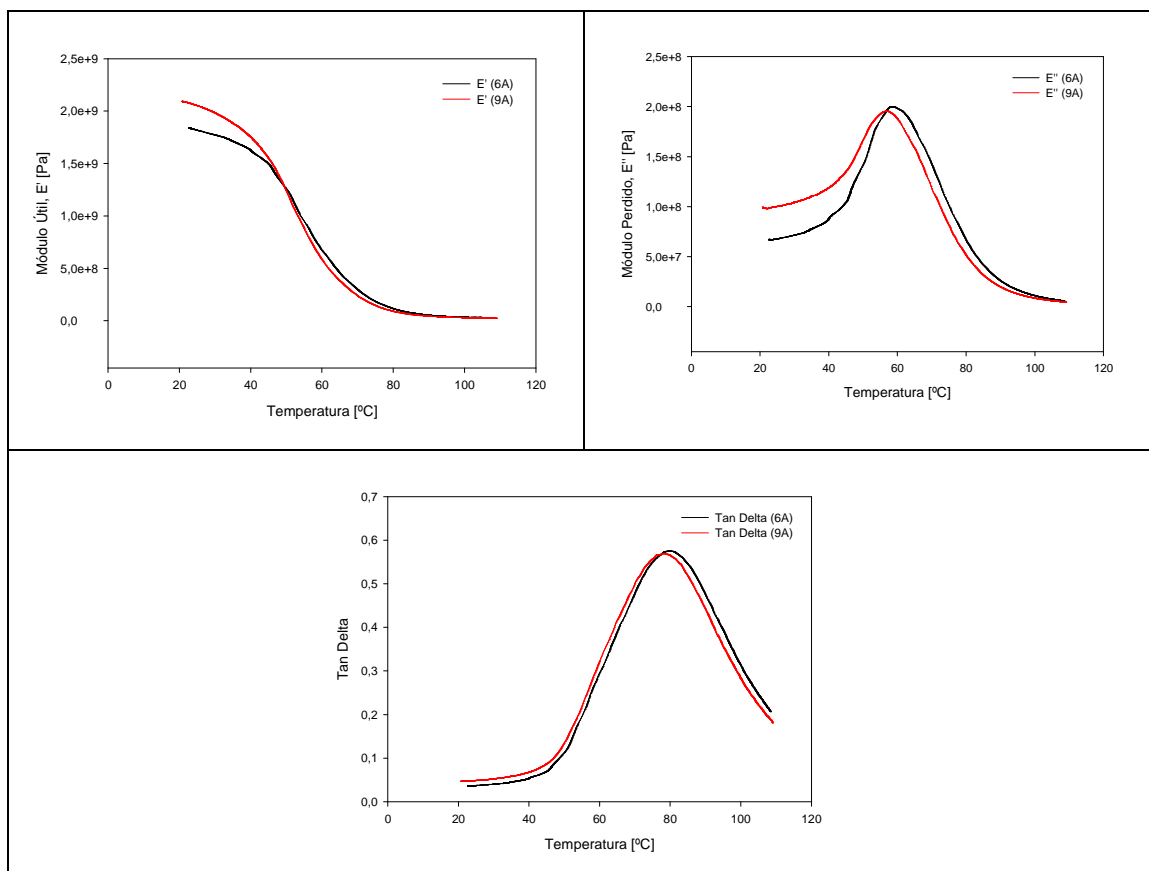


Figura 4.4 - Caso A231: Influência da posição de construção na plataforma nos provetes 6A e 9A (R9A > R6A)

Tabela 4. 4 - Caso A231: Resultados obtidos para os provetes 6A e 9A ($R9A > R6A$)

	Provete		Posição			
			Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
Distancia Varrimento 0,15 Profundidade Cura 0,225 Com Pós-Cura Posição Horizontal	6A	Temp. [°C]	22,90	58,30	79,84	104,99
		E' [Pa]	1,84E+09	7,55E+08	1,17E+08	3,02E+07
		E'' [Pa]	6,68E+07	2,00E+08	6,74E+07	7,40E+06
		Tan Delta	0,0364	0,2646	0,5757	0,2448
	9A	Temp. [°C]	22,86	57,24	78,46	104,81
		E' [Pa]	2,07E+09	7,35E+08	1,04E+08	2,63E+07
		E'' [Pa]	9,88E+07	1,95E+08	5,93E+07	5,87E+06
		Tan Delta	0,0476	0,2657	0,5693	0,2231

- **Caso A222**

Para provetes construídos na posição horizontal, usando-se uma profundidade de cura de 0.5 mm, uma distância entre linhas de varrimento de 0.15 mm, sem operações de pós-cura, verificou-se (de forma semelhante ao caso anterior) que o módulo útil inicial do provete 8B (maior distância em relação ao centro da plataforma) é maior que o obtido para o provete 5B (localizado no centro da plataforma de construção) (Figura 4.5 e Tabela 4.5). Com o aumento da temperatura verifica-se que ambos os provetes têm comportamentos semelhantes, tendo o provete 5B valores sempre superiores. Após os 80°C, os dois provetes passam a ter valores similares. O valor inicial do módulo perdido é igualmente superior no provete 8B (Figura 4.5 e Tabela 4.5). Esta diferença vai sendo reduzida até próximo da temperatura de 50°C, voltando a aumentar até se atingir a temperatura de transição vítrea. De T_g até aproximadamente 80°C, a diferença é constante (possuindo sempre o provete 8B valores de E'' superiores), e após os 80°C, essa diferença vai-se reduzindo até que na temperatura final de teste, ambos os provetes possuem valores similares.

O valor de $\tan \delta$ para a temperatura ambiente é similar para ambos os provetes (Figura 4.5 e Tabela 4.5). Contudo à medida que a temperatura vai aumentando, o valor de $\tan \delta$ para o provete 5B aumenta relação ao do provete 8B. A diferença máxima de valores ocorre no pico, onde o valor de $\tan \delta$ do provete 5B é 4.72% superior ao do provete 8B. A partir do pico e com o aumento da temperatura, o valor de $\tan \delta$ do provete 8B é ligeiramente superior ao do provete 5B.

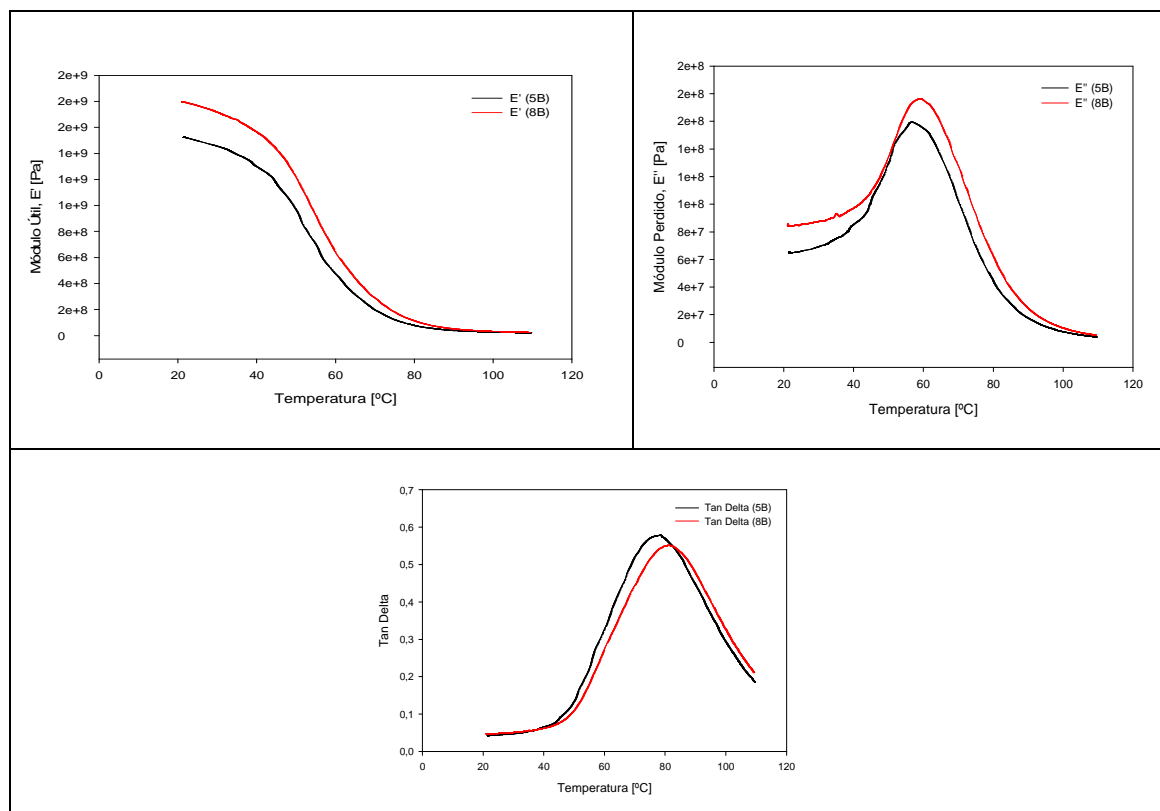


Figura 4.5 - Caso A222: Influência da posição de construção na plataforma nos provetes 5B e 8B (R8B >>> R5B)

Tabela 4.5 - Caso A222: Resultados obtidos para os provetes 5B e 8B (R8B >>> R5B)

	Proвете	Posição				
		Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C	
		Temp. [°C]	E' [Pa]	E'' [Pa]	Tan Delta	
Distancia Varrimento 0,15 Profundidade Cura 0,5 Sem Pós-Cura Posição Horizontal	5B	Temp. [°C]	23,45	56,55	78,49	104,93
		E' [Pa]	1,51E+09	5,99E+08	8,84E+07	2,28E+07
		E'' [Pa]	6,53E+07	1,59E+08	5,12E+07	5,28E+06
		Tan Delta	0,0433	0,2659	0,5784	0,2317
	8B	Temp. [°C]	23,00	58,69	81,15	105,23
		E' [Pa]	1,78E+09	7,08E+08	1,01E+08	2,70E+07
		E'' [Pa]	8,47E+07	1,76E+08	5,58E+07	6,91E+06
		Tan Delta	0,0475	0,2490	0,5511	0,2557

4.3.1.1.1.2 – Comparação de resultados

- Módulo útil à temperatura ambiente**

Para valores baixos de profundidade de cura (0.1 mm), provetes produzidos na posição horizontal e mais perto do centro da plataforma possuem valores de módulo útil superiores aos produzidos em posições mais afastadas do centro da plataforma de construção (Tabela 4.6). Contudo para valores médios (0.225 mm) ou valores elevados de profundidade de cura (0.5 mm), a situação inverte-se, e os provetes produzidos mais

perto do centro de gravidade passam a ter valores de módulo útil inferiores. Tal deve-se ao facto de, nestes casos, a intensidade de radiação nas zonas centrais da plataforma de construção serem maiores o que se traduz numa mais rápida solidificação da resina nas superiores da camada. Tal, origina uma diminuição significativa da intensidade de radiação em profundidade com consequências em termos de percentagem de material curado. Deste modo, os provetes produzidos em posições mais próximas do centro quando construídos com valores mais elevados de espessura de camada apresentam um valor médio de percentagem de material curado inferior, apresentando por isso mesmo menores propriedades mecânicas.

Tabela 4. 6 - Resultados globais obtidos para o módulo útil à temperatura ambiente

Caso	Provetes		Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Distancia	Módulo Útil E' [Pa]		Diferença	%
A211	4A	7A	Sim	0.1	0.15	$R_{4A} < R_{7A}$	2,12E+09	1,92E+09	-1,95E+08	-9,19
A231	6A	9A	Sim	0.225		$R_{6A} < R_{9A}$	1,84E+09	2,07E+09	2,39E+08	13,00
A222	5B	8B	Não	0.5		$R_{5B} < R_{8B}$	1,51E+09	1,78E+09	2,74E+08	18,13

- **Módulo perdido à temperatura ambiente**

Independentemente da profundidade de cura, produzir provetes mais afastados do centro da plataforma e na posição horizontal, implica um aumento do valor do módulo perdido à temperatura ambiente (Tabela 4.7). Em provetes submetidos a operações de pós-cura, a conjugação do aumento da distância de construção em relação ao centro da plataforma ($R_{4A} = R_{6A}$ e $R_{7A} = R_{9A}$), com o aumento da profundidade de cura, resulta num aumento do módulo perdido em termos percentuais.

Tabela 4. 7 - Resultados globais obtidos para o módulo perdido à temperatura ambiente

Caso	Provetes		Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Distancia	Módulo Perdido E'' [Pa]		Diferença	%
A211	4A	7A	Sim	0.1	0.15	$R_{4A} < R_{7A}$	6,83E+07	7,17E+07	3,39E+06	4,96
A231	6A	9A	Sim	0.225		$R_{6A} < R_{9A}$	6,68E+07	9,88E+07	3,20E+07	47,90
A222	5B	8B	Não	0.5		$R_{5B} < R_{8B}$	6,53E+07	8,47E+07	1,93E+07	29,61

- **Módulo perdido à temperatura de transição vítrea**

Provetes produzidos na posição horizontal, e com menor distancia ao centro da plataforma, possuem um valor de módulo perdido à temperatura de transição vítrea superior que os provetes produzidos em posições mais afastadas do centro da plataforma (Tabela 4.8).

Tabela 4. 8 - Resultados globais obtidos para o módulo perdido à temperatura de transição vítrea

Caso	Provetes		Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Distancia	Módulo Perdido E'' [Pa]		Diferença	%
A211	4A	7A	Sim	0.1	0.15	$R_{4A} < R_{7A}$	2,12E+08	1,92E+08	-1,95E+07	-9,24
A231	6A	9A	Sim	0.225		$R_{6A} < R_{9A}$	2,00E+08	1,95E+08	-4,52E+06	-2,26
A222	5B	8B	Não	0.5		$R_{5B} < R_{8B}$	1,59E+08	1,76E+08	1,70E+07	10,66

- Tan Delta à temperatura do pico de tan delta**

O valor de $\tan \delta$ diminui ligeiramente (o valor não é significativo) quando se produzem provetes mais afastados do centro da plataforma (Tabela 4.9).

Tabela 4. 9 - Resultados globais obtidos para tan delta à temperatura do pico de tan delta

Caso	Provetes		Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Distancia	Tan Delta		Diferença	%
A211	4A	7A	Sim	0.1	0.15	$R_{4A} < R_{7A}$	0,5760	0,5580	-0,0180	-3,13
A231	6A	9A	Sim	0.225		$R_{6A} < R_{9A}$	0,5757	0,5693	-0,0064	-1,12
A222	5B	8B	Não	0.5		$R_{5B} < R_{8B}$	0,5784	0,5511	-0,0273	-4,72

4.3.1.1.2 – Posição Vertical

4.3.1.1.2.1 – Resultados

- Caso B211**

Para provetes construídos na posição vertical, usando-se uma profundidade de cura de 0.1 mm, uma distância entre linhas de varrimento de 0.025 mm e operações de pós-cura, obtiveram-se resultados semelhantes aos apresentados para o caso A231, com o provete 7C (maior distância em relação ao centro da plataforma) a apresentar um valor inicial de módulo útil superior em cerca de 9% ao provete 4C (Figura 4.6 e Tabela 4.10). O valor inicial do módulo perdido do provete 7C é igualmente superior em cerca de 19% relativamente ao 4C. Entre a temperatura ambiente e T_g , a diferença de valores entre ambos mantêm-se constante. Para T_g , o valor do módulo perdido do provete 7C é cerca de 10% superior ao do provete 4C. Para valores superiores ao pico de E'' , o comportamento dos dois provetes é similar.

Relativamente a $\tan \delta$ não se observam diferenças significativas.

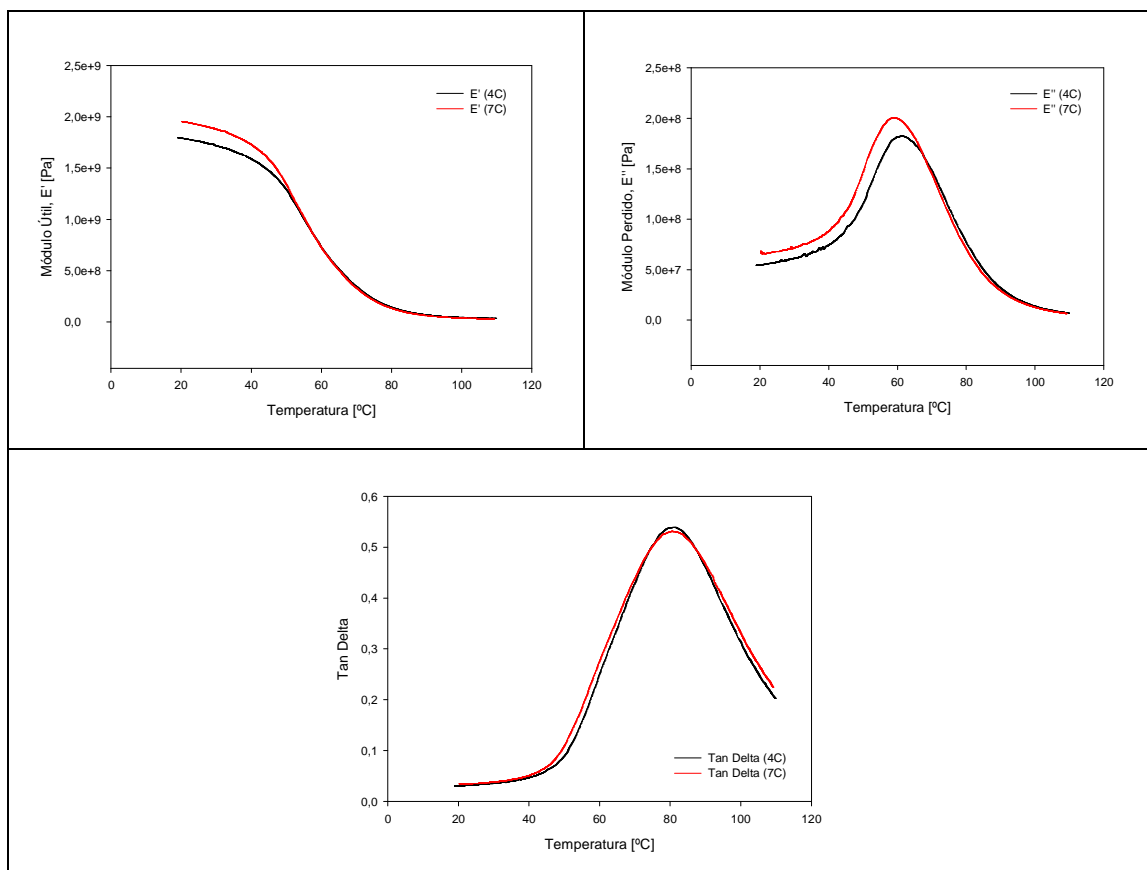


Figura 4. 6 - Caso B211: Influência da posição de construção na plataforma nos provetes 4C e 7C ($R7C > R4C$)

Tabela 4. 10 - Caso B211: Resultados obtidos para os provetes 4C e 7C ($R7C > R4C$)

			Posição			
			Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
Distancia Varrimento 0,15 Profundidade Cura 0,1 Com Pós-Cura Posição Vertical	4C	Temp. [°C]	22,89	61,03	80,86	104,96
		E' [Pa]	1,77E+09	6,76E+08	1,33E+08	3,80E+07
		E'' [Pa]	5,63E+07	1,83E+08	7,18E+07	9,51E+06
		Tan Delta	0,0317	0,2702	0,5388	0,2504
	7C	Temp. [°C]	23,10	58,90	80,41	104,78
		E' [Pa]	1,93E+09	7,84E+08	1,27E+08	3,24E+07
		E'' [Pa]	6,69E+07	2,01E+08	6,77E+07	8,81E+06
		Tan Delta	0,0346	0,2557	0,5310	0,2715

• Caso B231

Para provetes construídos na posição vertical, usando-se uma profundidade de cura de 0.225 mm, uma distância entre linhas de varrimento de 0.15 mm e operações de pós-cura, obtiveram-se tendências semelhantes às observadas nos casos A231 e B211, com o provete 9C (maior distância em relação ao centro da plataforma) a apresentar um

módulo útil inicial superior ao do provete 6C (Figura 4.7 e Tabela 4.11). O mesmo acontece com o módulo perdido (Figura 4.7 e Tabela 4.11). A partir da Figura 4.7 e da Tabela 4.11 é também possível observar que relativamente a $\tan \delta$ ambos os provetes possuem comportamentos similares.

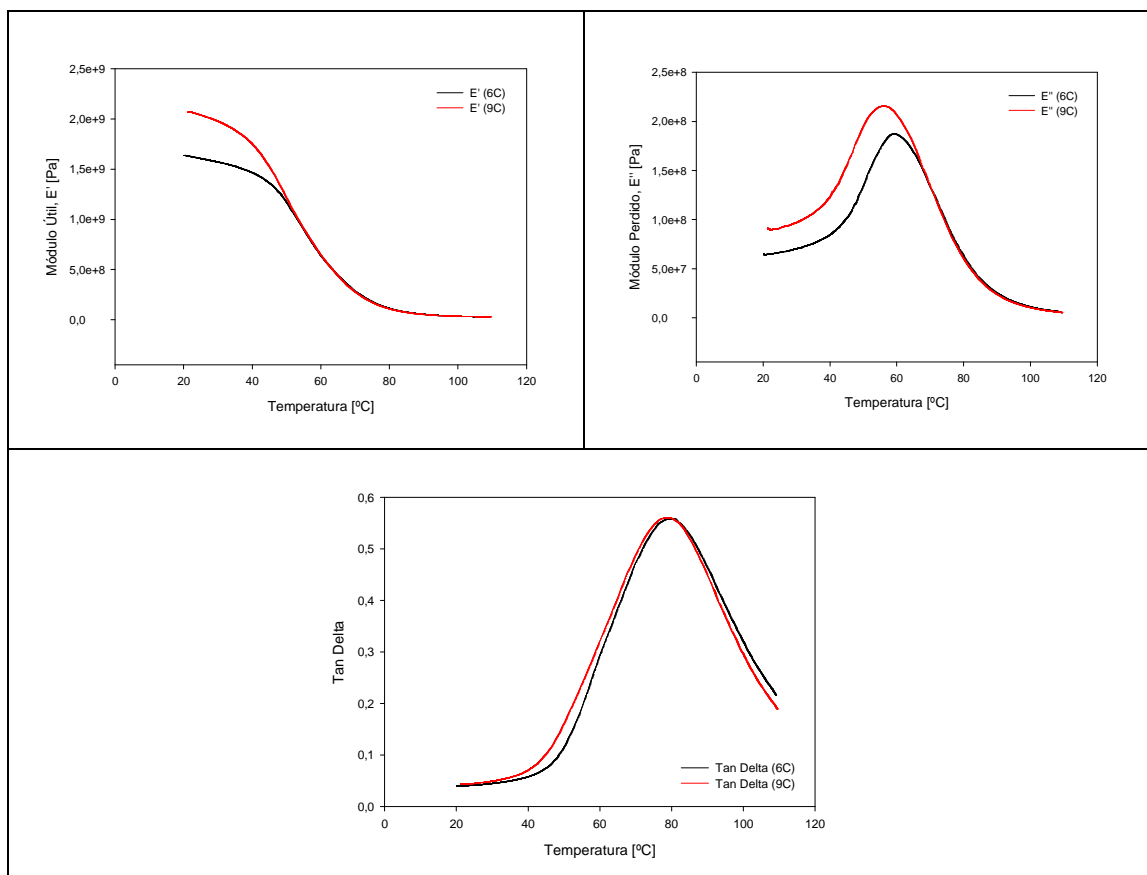


Figura 4. 7 - Caso B231: Influência da posição de construção na plataforma nos provetes 6C e 9C (R9C > R6C)

Tabela 4. 11 - Caso B231: Resultados obtidos para os provetes 6C e 9C (R9C > R6C)

	Provete	Posição				
			Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
		Temp. [°C]				
Distancia Varrimento 0,15 Profundidade Cura 0,225 Com Pós-Cura Posição Vertical	6C	Temp. [°C]	23,05	59,05	79,64	105,01
		E' [Pa]	1,62E+09	6,85E+08	1,17E+08	2,99E+07
		E'' [Pa]	6,54E+07	1,87E+08	6,50E+07	7,71E+06
		Tan Delta	0,0404	0,2733	0,5582	0,2582
	9C	Temp. [°C]	22,98	56,26	78,51	104,95
		E' [Pa]	2,06E+09	8,36E+08	1,23E+08	3,04E+07
		E'' [Pa]	9,03E+07	2,16E+08	6,88E+07	7,10E+06
		Tan Delta	0,0438	0,2581	0,5603	0,2336

- **Caso B221**

Para provetes construídos na posição vertical, usando-se uma profundidade de cura de 0.5 mm, uma distância entre linhas de varrimento de 0.15 mm e operações de pós-cura, obtiveram-se tendências semelhantes às observadas nos casos A231, A222, B211 e B231, com o provete 8C (maior distância em relação centro da plataforma) a apresentar um valor inicial de módulo útil superior ao do provete 5C (Figura 4.8 e Tabela 4.12). Para o módulo perdido e $\tan \delta$, os provetes 5C e 8C apresentam, um comportamento semelhante ao observado no caso B211.

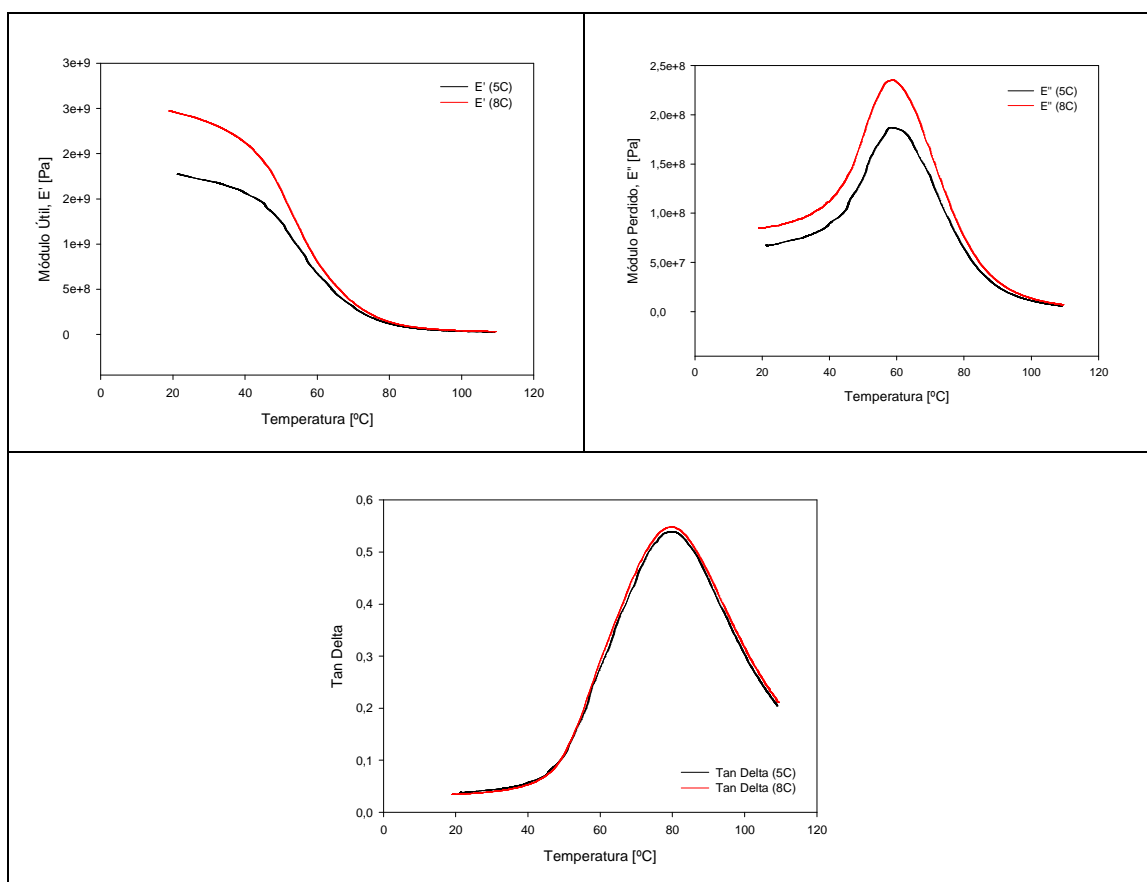


Figura 4. 8 - Caso B221: Influência da posição de construção na plataforma nos provetes 5C e 8C (R8C >>> R5C)

Tabela 4. 12 - Caso B221: Resultados obtidos para os provetes 5C e 8C ($R_{8C} \gg R_{5C}$)

	Provete		Posição			
			Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
Distancia Varrimento 0,15 Profundidade Cura 0,5 Sem Pós-Cura Posição Vertical	5C	Temp. [°C]	22,65	58,06	78,71	105,19
		E' [Pa]	1,76E+09	7,61E+08	1,32E+08	3,15E+07
		E'' [Pa]	6,78E+07	1,87E+08	7,11E+07	7,60E+06
		Tan Delta	0,0385	0,2456	0,5386	0,2410
	8C	Temp. [°C]	22,88	58,75	80,04	105,18
		E' [Pa]	2,43E+09	8,84E+08	1,38E+08	3,66E+07
		E'' [Pa]	8,67E+07	2,35E+08	7,54E+07	9,28E+06
		Tan Delta	0,0357	0,2665	0,5480	0,2532

4.3.1.1.2.2 – Comparação de resultados

- **Módulo útil à temperatura ambiente**

Em provetes produzidos na posição vertical, verifica-se que o aumento da distância de construção em relação ao centro da plataforma resulta num aumento do valor do módulo útil à temperatura ambiente (Tabela 4.13). Em provetes submetidos a operações de pós-cura, a conjugação do aumento da distância de construção em relação ao centro da plataforma ($R_{4A} = R_{6A}$ e $R_{7A} = R_{9A}$), com o aumento da profundidade de cura, resulta num aumento do módulo útil em termos percentuais.

Tabela 4. 13 - Resultados globais obtidos para o módulo útil à temperatura ambiente

Caso	Provetes		Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Distancia	Módulo Útil E' [Pa]		Diferença	%
B211	4C	7C	Sim	0.1	0.15	$R_{4C} < R_{7C}$	1,77E+09	1,93E+09	1,61E+08	9,08
B231	6C	9C	Sim	0.225		$R_{6C} < R_{9C}$	1,62E+09	2,06E+09	4,41E+08	27,25
B221	5C	8C	Não	0.5		$R_{5B} \ll R_{8B}$	1,76E+09	2,43E+09	6,71E+08	38,10

- **Módulo perdido à temperatura ambiente**

O módulo perdido à temperatura ambiente tem um comportamento similar ao do módulo útil. O aumento da distância de construção resulta num aumento do módulo perdido (Tabela 4.14). Em provetes submetidos a operações de pós-cura, a conjugação do aumento da distância de construção em relação ao centro da plataforma ($R_{4A} = R_{6A}$ e $R_{7A} = R_{9A}$), com o aumento da profundidade de cura, também resulta num aumento do módulo perdido em termos percentuais.

Tabela 4. 14 - Resultados globais obtidos para o módulo perdido à temperatura ambiente

Caso	Provetes		Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Distancia	Módulo Perdido E'' [Pa]		Diferença	%
B211	4C	7C	Sim	0.1	0.15	$R_{4C} < R_{7C}$	5,63E+07	6,69E+07	1,07E+07	18,94
B231	6C	9C	Sim	0.225		$R_{6C} < R_{9C}$	6,54E+07	9,03E+07	2,49E+07	38,10
B221	5C	8C	Não	0.5		$R_{5B} < R_{8B}$	6,78E+07	8,67E+07	1,89E+07	27,90

- Módulo perdido à temperatura de transição vítrea**

Tal como à temperatura ambiente, também à temperatura de transição vítrea o módulo perdido apresenta a mesma tendência de variação com a posição de construção e a profundidade de cura (Tabela 4.15).

Tabela 4. 15 - Resultados globais obtidos para o módulo perdido à temperatura de transição vítrea

Caso	Provetes		Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Distancia	Módulo Perdido E'' [Pa]		Diferença	%
B211	4C	7C	Sim	0.1	0.15	$R_{4C} < R_{7C}$	1,83E+08	2,01E+08	1,80E+07	9,86
B231	6C	9C	Sim	0.225		$R_{6C} < R_{9C}$	1,87E+08	2,16E+08	2,84E+07	15,19
B221	5C	8C	Não	0.5		$R_{5B} < R_{8B}$	1,87E+08	2,35E+08	4,85E+07	25,91

- Tan Delta à temperatura do pico de tan delta**

A posição de construção dos provetes não interfere com os valores da $\tan \delta$ (Tabela 4.16).

Tabela 4. 16 - Resultados globais obtidos para tan delta à temperatura do pico de tan delta

Caso	Provetes		Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Distancia	Tan Delta		Diferença	%
B211	4C	7C	Sim	0.1	0.15	$R_{4C} < R_{7C}$	0,5388	0,5310	-0,0077	-1,43
B231	6C	9C	Sim	0.225		$R_{6C} < R_{9C}$	0,5582	0,5603	0,0021	0,38
B221	5C	8C	Não	0.5		$R_{5B} < R_{8B}$	0,5386	0,5480	0,0094	1,75

4.3.1.2 – Temperatura de transição vítrea

Na Tabela 4.17 estão apresentados os valores de T_g para provetes construídos na horizontal em diferentes posições na zona de construção. Dado que a distribuição de energia varia do centro da plataforma de construção para a periferia, tal significa, para os mesmos tempos de exposição, que o valor da percentagem de material curado seja ligeiramente diferente e consequentemente o mesmo se ocorra com T_g . Assim verifica-se que os provetes produzidos na extremidade da plataforma (casos 7A, 9A e 8B) e submetidos a operações de pós-cura apresentam menor valor de T_g . No caso dos provetes não submetidos à operação de pós-cura, verifica-se que os provetes (caso 8B) produzidos na extremidade da plataforma apresentam maior valor de T_g . Neste ultimo

caso predomina o efeito da variação da intensidade de radiação com a espessura (diferente cinética de cura em profundidade) e o valor médio de percentagem de material curado na camada.

Tabela 4. 17 - Variação da temperatura de transição vítrea, função da posição de construção na plataforma em provetes construídos na posição horizontal

Caso	Provetes		Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Distancia [R]	T _g [°C]		Diferença	%
A211	4A	7A	Sim	0.1	0.15	R _{4A} < R _{7A}	60,35	57,95	2,40	-3,98
A231	6A	9A	Sim	0.225		R _{6A} < R _{9A}	58,30	57,24	1,06	-1,82
A222	5B	8B	Não	0.5		R _{5B} <<< R _{8B}	56,55	58,69	-2,14	3,78

Tal como para os provetes produzidos na posição horizontal, nos provetes produzidos na posição vertical, os que são produzidos na extremidade da plataforma e submetidos à operação de pós-cura possuem menor valor de T_g (casos 7C e 9C) e os não submetidos à operação de pós-cura possuem maior valor de T_g (caso 8C) (Tabela 4.18).

Tabela 4. 18 - Variação da temperatura de transição vítrea, função da posição de construção na plataforma em provetes construídos na posição vertical

Caso	Provetes		Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Distancia [R]	T _g [°C]		Diferença	%
B211	4C	7C	Sim	0.1	0.15	R _{4C} < R _{7C}	61,03	58,90	2,13	-3,48
B231	6C	9C	Sim	0.225		R _{6C} < R _{9C}	59,05	56,26	2,79	-4,72
B221	5C	8C	Não	0.5		R _{5C} <<< R _{8C}	58,06	58,75	-0,69	1,18

4.3.2 – Caso II: Efeito da variação do espaçamento entre linhas de varrimento

4.3.2.1 – Propriedades mecânicas

4.3.2.1.1 – Posição Horizontal

4.3.2.1.1.1 – Resultados

- **Caso A111 / Caso A211**

O aumento do espaçamento entre linhas de varrimento traduziu-se num aumento do valor inicial do módulo útil. Contudo, à medida que a temperatura aumenta, a diferença vai diminuindo até que por volta dos 50°C, o valor do módulo útil do provete 7A passa a ser ligeiramente inferior (Figura 4.9 e Tabela 4.19). Quando a temperatura final de teste é atingida, o valor do módulo útil em ambos os provetes é similar. Para a temperatura

ambiente, o valor de E'' do provete 7A é superior à do provete 1A. Entre a temperatura ambiente e a temperatura de transição vítrea, a diferença mantém-se constante, vindo o provete 7A a atingir um pico de E'' de valor superior. Após a temperatura de transição vítrea verifica-se que os valores do provete 7A diminuem mais rapidamente. Para valores de temperatura ambiente ambos os provetes possuem valores de $\tan \delta$ similares (Figura 4.9 e Tabela 4.19). Por volta dos 40°C, os valores do provete 7A começam a aumentar mais rapidamente atingindo o pico de $\tan \delta$ mais cedo e com um valor superior. Após o pico de $\tan \delta$, e até se atingir a temperatura final de teste, o provete 7A passa a ter valores inferiores.

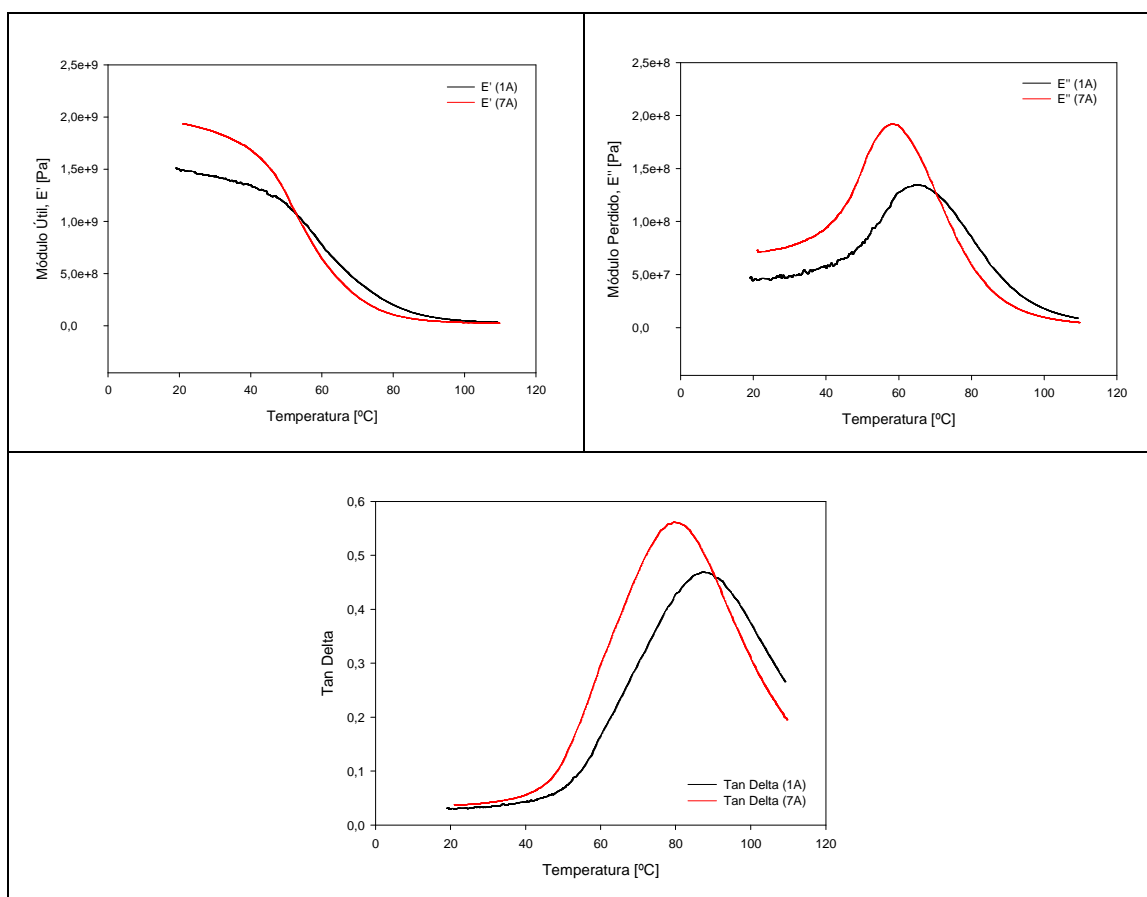


Figura 4. 9 - Caso A111 (1A) versus Caso A211 (7A): Influência da distância de varrimento nos provetes 1A (distancia de varrimento 0.025 mm) e 7A (distancia de varrimento 0.15 mm)

Tabela 4. 19 - Resultados obtidos para os provetes 1A e 7A

Profundidade Cura 0,1 Com Pós-Cura Posição Horizontal $R_{1A} = R_{7A}$	Provete	Posição				
		Temp. [°C]	T _{amb} [°C]	T _g (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
Distancia Varrimento 0,025	1A	Temp. [°C]	23,61	65,53	87,36	105,14
		E' [Pa]	1,48E+09	5,66E+08	1,08E+08	3,81E+07
		E'' [Pa]	4,61E+07	1,35E+08	5,07E+07	1,19E+07
		Tan Delta	0,0312	0,2380	0,4690	0,3112
Distancia Varrimento 0,150	7A	Temp. [°C]	22,84	57,95	77,95	105,29
		E' [Pa]	1,92E+09	7,50E+08	1,27E+08	2,69E+07
		E'' [Pa]	7,17E+07	1,92E+08	7,09E+07	6,46E+06
		Tan Delta	0,0373	0,2560	0,5580	0,2405

- **Caso A112 / Caso A212**

Os provetes 1B (0.025 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) e 7B (0.15 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) possuem um comportamento similar ao caso A111 / A211 (Figura 4.10 e Tabela 4.20).

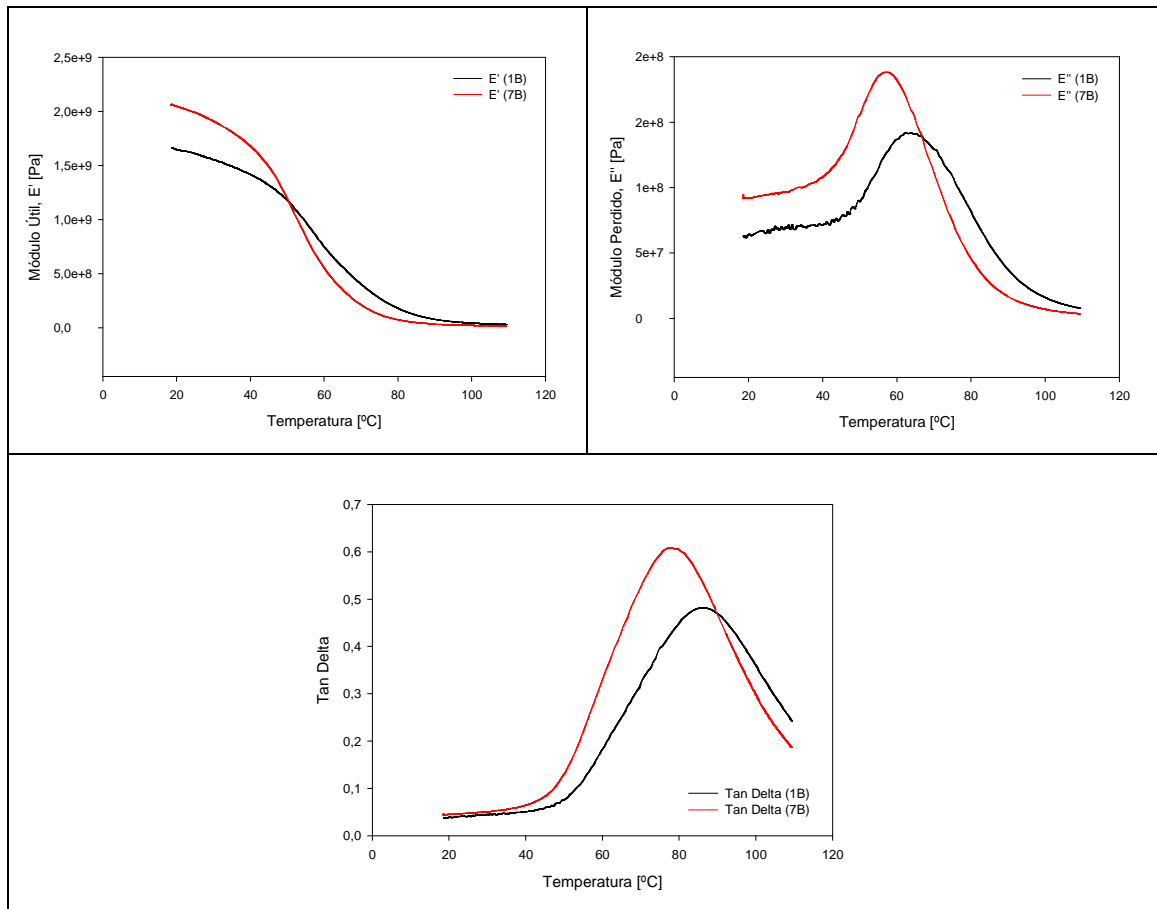


Figura 4. 10 - Resultados obtidos para os provetes 1A e 7A

Tabela 4. 20 - Resultados obtidos para os provetes 1B e 7B

Profundidade Cura 0,1 Sem Pós-Cura Posição Horizontal $R_{1B} = R_{7B}$	Provete	Posição				
		Temp. [°C]	Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
Distancia Varrimento 0,025	1B	Temp. [°C]	23,08	62,18	86,35	105,16
		E' [Pa]	1,63E+09	6,60E+08	1,04E+08	3,61E+07
		E'' [Pa]	6,67E+07	1,42E+08	5,02E+07	1,05E+07
		Tan Delta	0,0410	0,2154	0,4818	0,2917
Distancia Varrimento 0,150	7B	Temp. [°C]	22,85	57,26	77,53	105,11
		E' [Pa]	2,01E+09	6,96E+08	9,50E+07	2,04E+07
		E'' [Pa]	9,35E+07	1,88E+08	5,78E+07	4,69E+06
		Tan Delta	0,0464	0,2701	0,6089	0,2300

- **Caso A131 / Caso A231**

Os provetes 3A (0.025 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) e 9A (0.15 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) possuem um comportamento similar aos casos A111 / A211 e A112 / 212 (Figura 4.11 e Tabela 4.21).

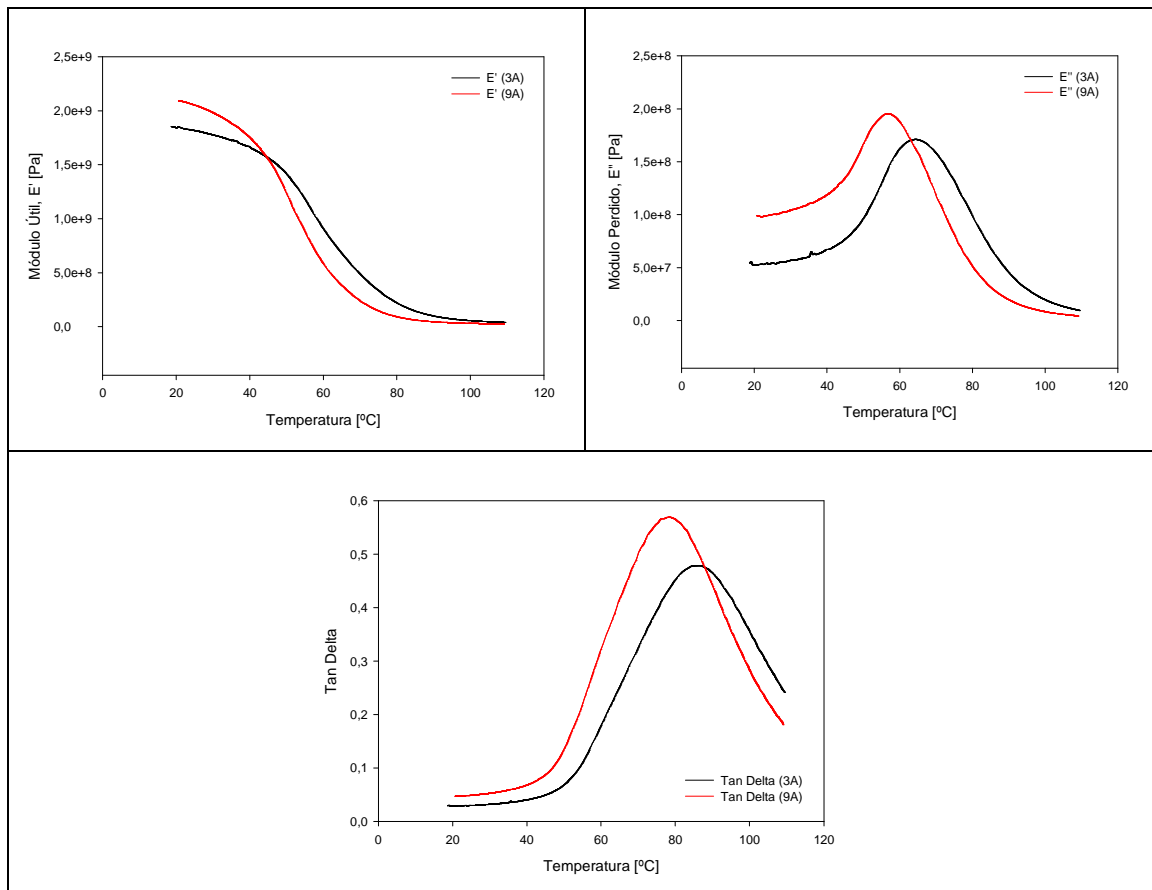


Figura 4. 11 - Caso A131 (3A) versus Caso A231 (9A): Influência da distância de varrimento nos provetes 3A (distância de varrimento 0.025 mm) e 9A (distancia de varrimento 0.15 mm)

Tabela 4. 21 - Resultados obtidos para os provetes 3A e 9A

Profundidade Cura 0,225 Com Pós-Cura Posição Horizontal $R_{3A} = R_{9A}$	Provete	Posição				
		Temp. [°C]	Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
Distancia Varrimento 0,025	3A	Temp. [°C]	23,36	64,29	85,91	104,90
		E' [Pa]	1,83E+09	7,06E+08	1,33E+08	4,56E+07
		E'' [Pa]	5,42E+07	1,71E+08	6,37E+07	1,33E+07
		Tan Delta	0,0297	0,2423	0,4783	0,2922
Distancia Varrimento 0,150	9A	Temp. [°C]	22,86	57,24	78,46	104,81
		E' [Pa]	2,07E+09	7,35E+08	1,04E+08	2,63E+07
		E'' [Pa]	9,88E+07	1,95E+08	5,93E+07	5,87E+06
		Tan Delta	0,0476	0,2657	0,5693	0,2231

• **Caso A132 / Caso A232**

Os provetes 3B (0.025 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) e 9B (0.15 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) possuem um comportamento similar aos casos A111 / A211, A112 / 212 e A131 / A231 (Figura 4.12 e Tabela 4.22).

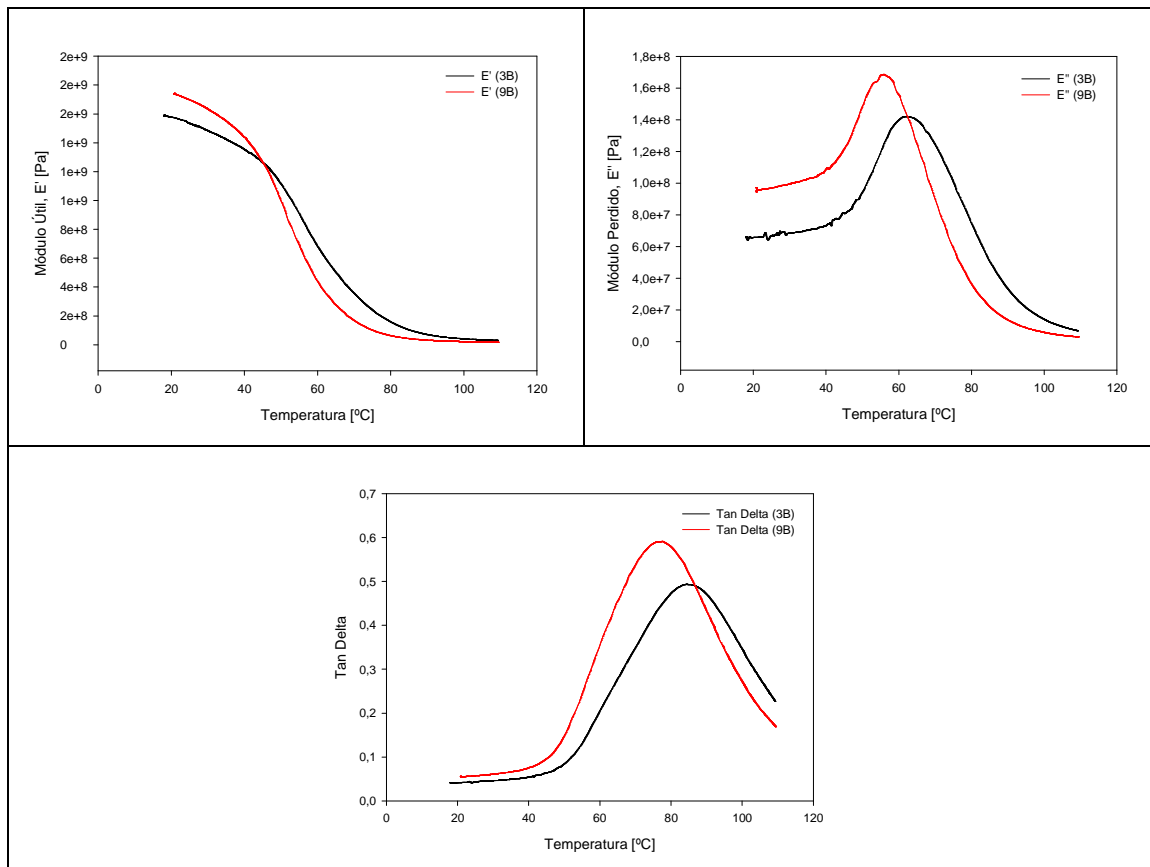


Figura 4. 12 - Caso A132 (3B) versus A232 (9B): Influência da distância de varrimento nos provetes 3B (distancia de varrimento 0.025 mm) e 9B (distancia de varrimento 0.15 mm)

Tabela 4. 22 - Resultados obtidos para os provetes 3B e 9B

Profundidade Cura 0,225 Sem Pós-Cura Posição Horizontal $R_{3B} = R_{9B}$	Provete	Posição				
		Temp. [°C]	Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
Distancia Varrimento 0,025	3B	Temp. [°C]	23,19	62,11	84,56	105,13
		E' [Pa]	1,55E+09	5,99E+08	1,06E+08	3,39E+07
		E'' [Pa]	6,88E+07	1,42E+08	5,24E+07	9,35E+06
		Tan Delta	0,0443	0,2370	0,4932	0,2758
Distancia Varrimento 0,150	9B	Temp. [°C]	23,01	55,94	77,55	104,94
		E' [Pa]	1,72E+09	6,35E+08	7,86E+07	1,92E+07
		E'' [Pa]	9,63E+07	1,69E+08	4,64E+07	4,02E+06
		Tan Delta	0,0561	0,2653	0,5909	0,2096

- **Caso A121 / Caso A221**

Para a temperatura ambiente e temperatura final de teste, o valor do módulo útil do provete 8A (0.15 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) é similar ao do provete 2A (0.025 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) (Figura 4.13 e Tabela 4.23). Para temperaturas intermédias, o valor do módulo útil do provete 8A é inferior ao do provete 2A.

Para a temperatura ambiente, o valor de E'' do provete 8A é superior ao do provete 2A (Figura 4.13 e Tabela 4.23). Entre a temperatura ambiente e a temperatura de transição vítrea, a diferença mantêm-se constante, com o provete 8A a ter um pico de E'' inferior ao do provete 2A. Após a temperatura de transição vítrea verifica-se que a diferença de valores entre os provetes mantêm-se constante, com o provete 2A a ter valores superiores. Na fase final do teste a diferença entre os valores de ambos os provetes reduz-se.

Para valores de temperatura ambiente ambos os provetes possuem valores de $\tan \delta$ similares (Figura 4.13 e Tabela 4.23). Por volta dos 50°C, os valores do provete 8A começam a aumentar mais rapidamente atingindo o pico de $\tan \delta$ mais cedo e com um valor superior. Após o pico de $\tan \delta$, e até se atingir a temperatura final de teste, o provete 7A passa a ter valores ligeiramente inferiores.

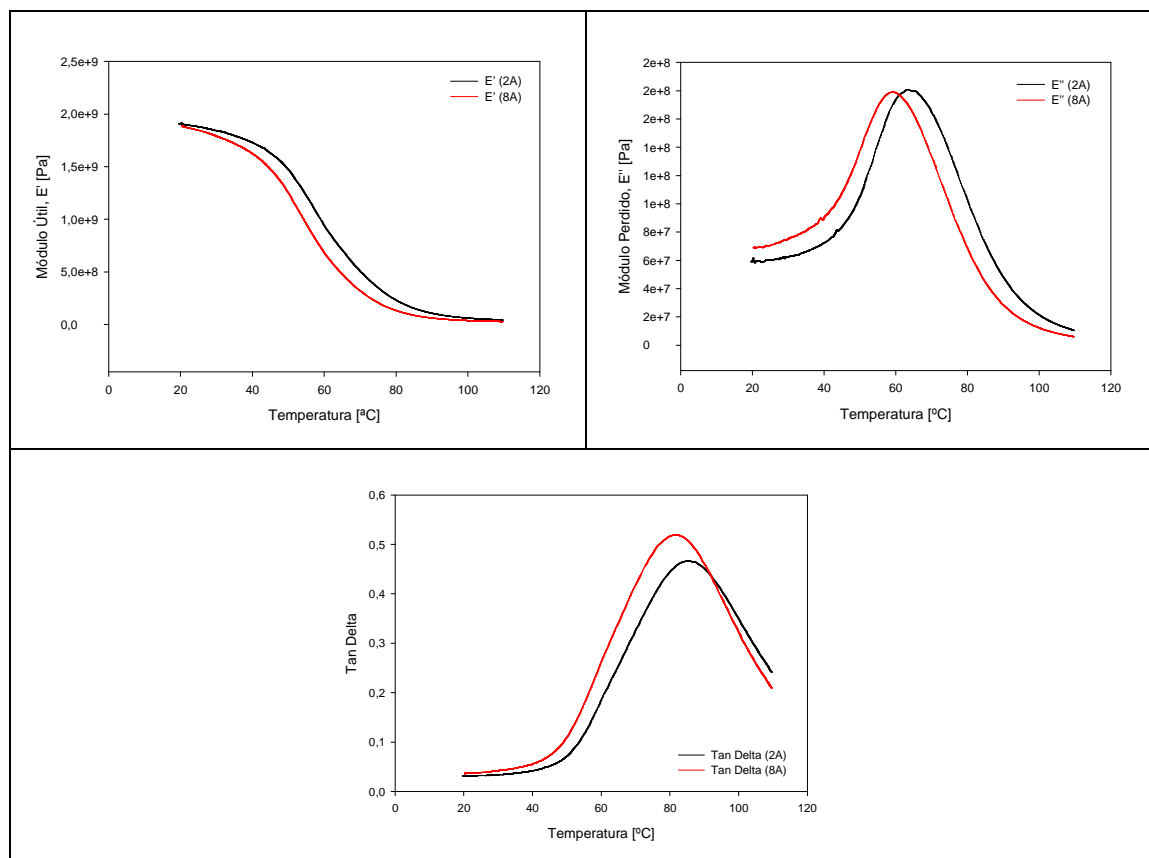


Figura 4. 13 - Caso A121 (2A) versus Caso A221 (8A): Influência da distância de varrimento nos provetes 2A (distância de varrimento 0.025 mm) e 8A (distância de varrimento 0.15 mm)

Tabela 4. 23 - Resultados obtidos para os provetes 2A e 8A

Profundidade Cura 0,5 Com Pós-Cura Posição Horizontal R _{2A} = R _{8A}	Provete		Posição			
			Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
Distancia Varrimento 0,025	2A	Temp. [°C]	23,36	63,19	85,44	105,13
		E' [Pa]	1,89E+09	7,84E+08	1,48E+08	5,03E+07
		E'' [Pa]	5,94E+07	1,81E+08	6,92E+07	1,45E+07
		Tan Delta	0,0315	0,2307	0,4668	0,2891
Distancia Varrimento 0,150	8A	Temp. [°C]	23,26	59,29	81,60	104,89
		E' [Pa]	1,86E+09	7,16E+08	1,15E+08	3,25E+07
		E'' [Pa]	6,94E+07	1,79E+08	5,96E+07	8,44E+06
		Tan Delta	0,0373	0,2499	0,5192	0,2593

- Caso A122 / Caso A222**

Os provetes 2B (0.025 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) e 8B (0.15 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) possuem um comportamento similar ao observado nos casos A121 / A221 para o módulo útil e para $\tan \delta$. Para o módulo

perdido, a única diferença é que o provete 8B possui um pico superior (Figura 4.14 e Tabela 4.24).

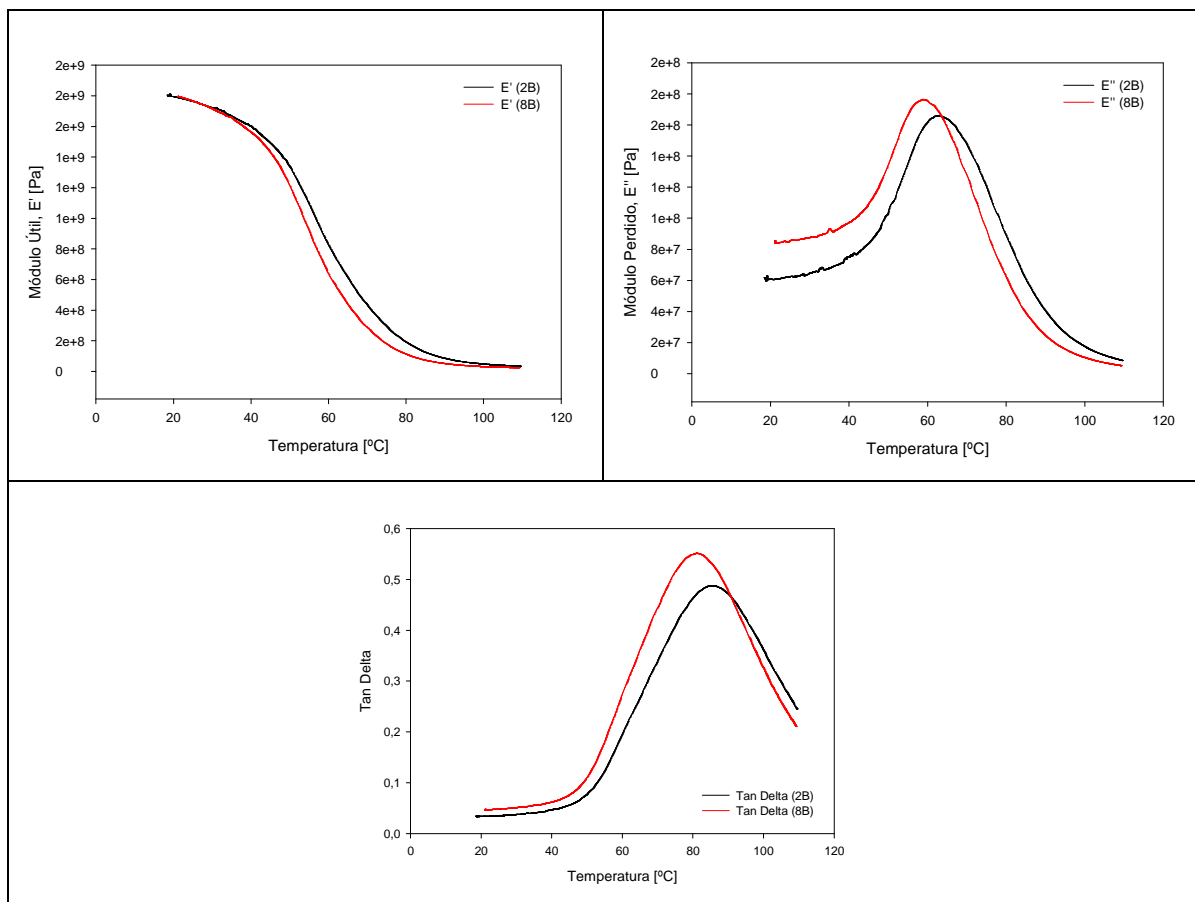


Figura 4. 14 - Caso A122 (2B) versus Caso A222 (8B): Influência da distância de varrimento nos provetes 2B (distância de varrimento 0.025 mm) e 8B (distância de varrimento 0.15 mm)

Tabela 4. 24 - Resultados obtidos para os provetes 2B e 8B

Profundidade Cura 0,5 Sem Pós-Cura Posição Horizontal $R_{2B} = R_{8B}$	Proвете	Posição				
			Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
Distancia Varrimento 0,025	2B	Temp. [°C]	22,81	62,85	84,88	105,04
		E' [Pa]	1,78E+09	7,00E+08	1,26E+08	3,97E+07
		E'' [Pa]	6,14E+07	1,66E+08	6,14E+07	1,18E+07
		Tan Delta	0,0345	0,2368	0,4871	0,2973
Distancia Varrimento 0,150	8B	Temp. [°C]	23,00	58,69	81,15	105,23
		E' [Pa]	1,78E+09	7,08E+08	1,01E+08	2,70E+07
		E'' [Pa]	8,47E+07	1,76E+08	5,58E+07	6,91E+06
		Tan Delta	0,0475	0,2490	0,5511	0,2557

4.3.2.1.1.2 – Comparação de resultados

- **Módulo útil à temperatura ambiente**

Verifica-se que para valores de profundidade de cura baixa (0.1 mm) ou média (0.225 mm), o aumento da distância de espaçamento entre linhas de varrimento aumenta o valor do módulo útil à temperatura ambiente (Tabela 2.25). Estes resultados foram algo inesperados mas podem dever-se ao facto dos valores de espaçamento entre linhas de varrimento não serem muito significativos e garantirem um elevado grau de sobreposição (o spot laser é de cerca de 0.2 mm) podendo ocorrer no caso de menor espaçamento um efeito de grande solidificação superficial e menor valor de percentagem de material curado global.

Tabela 4. 25 - Resultados globais obtidos para o módulo útil à temperatura ambiente

Caso	Distancia Varrimento		Profundidade de cura	Pós-Cura	Módulo Útil E' [Pa]		Diferença	%
	0.025	0.15						
A111 versus A211	1A	7A	0.1	Sim	1,48E+09	1,92E+09	4,43E+08	29,96
A112 versus A212	1B	7B	0.1	Não	1,63E+09	2,01E+09	3,88E+08	23,84
A131 versus A231	3A	9A	0.225	Sim	1,83E+09	2,07E+09	2,49E+08	13,63
A132 versus A232	3B	9B	0.225	Não	1,55E+09	1,72E+09	1,63E+08	10,47
A121 versus A221	2A	8A	0.5	Sim	1,89E+09	1,86E+09	-2,68E+07	-1,42
A122 versus A222	2B	8B	0.5	Não	1,78E+09	1,78E+09	3,66E+06	0,21

- **Módulo perdido à temperatura ambiente**

O aumento da distância de espaçamento entre linhas de varrimento aumenta o valor do módulo perdido à temperatura ambiente (Tabela 4.26).

Tabela 4. 26 - Resultados globais obtidos para o módulo perdido à temperatura ambiente

Caso	Distancia Varrimento		Profundidade de cura	Pós-Cura	Módulo Perdido E'' [Pa]		Diferença	%
	0.025	0.15						
A111 versus A211	1A	7A	0.1	Sim	4,61E+07	7,17E+07	2,56E+07	55,55
A112 versus A212	1B	7B	0.1	Não	6,67E+07	9,35E+07	2,67E+07	40,05
A131 versus A231	3A	9A	0.225	Sim	5,42E+07	9,88E+07	4,46E+07	82,17
A132 versus A232	3B	9B	0.225	Não	6,88E+07	9,63E+07	2,75E+07	40,02
A121 versus A221	2A	8A	0.5	Sim	5,94E+07	6,94E+07	1,00E+07	16,82
A122 versus A222	2B	8B	0.5	Não	6,14E+07	8,47E+07	2,32E+07	37,76

- **Módulo perdido à temperatura de transição vítrea**

Para valores de profundidade de cura baixa (0.1 mm) ou média (0.225 mm), o aumento da distância de espaçamento entre linhas de varrimento resulta num aumento do valor do módulo perdido à temperatura de transição vítrea (Tabela 4.27).

Tabela 4. 27 - Resultados globais obtidos para o módulo perdido à temperatura de transição vítrea

Caso	Distancia Varrimento		Profundidade de cura	Pós-Cura	Módulo Perdido E'' [Pa]		Diferença	%
	0.025	0.15						
A111 versus A211	1A	7A	0.1	Sim	1,35E+08	1,92E+08	5,74E+07	42,61
A112 versus A212	1B	7B	0.1	Não	1,42E+08	1,88E+08	4,60E+07	32,41
A131 versus A231	3A	9A	0.225	Sim	1,71E+08	1,95E+08	2,41E+07	14,07
A132 versus A232	3B	9B	0.225	Não	1,42E+08	1,69E+08	2,65E+07	18,67
A121 versus A221	2A	8A	0.5	Sim	1,81E+08	1,79E+08	-1,89E+06	-1,04
A122 versus A222	2B	8B	0.5	Não	1,66E+08	1,76E+08	1,06E+07	6,38

- **Tan Delta à temperatura do pico de tan delta**

O aumento da distância de espaçamento entre linhas de varrimento aumenta o valor de $\tan \delta$ à temperatura do pico (Tabela 4.28).

Tabela 4. 28 - Resultados globais obtidos para tan delta à temperatura do pico de tan delta

Caso	Distancia Varrimento		Profundidade de cura	Pós-Cura	Tan Delta		Diferença	%
	0.025	0.15						
A111 versus A211	1A	7A	0.1	Sim	0,4690	0,5580	0,0890	18,98
A112 versus A212	1B	7B	0.1	Não	0,4818	0,6089	0,1271	26,38
A131 versus A231	3A	9A	0.225	Sim	0,4783	0,5693	0,0910	19,03
A132 versus A232	3B	9B	0.225	Não	0,4932	0,5909	0,0977	19,82
A121 versus A221	2A	8A	0.5	Sim	0,4668	0,5192	0,0524	11,22
A122 versus A222	2B	8B	0.5	Não	0,4871	0,5511	0,0641	13,15

4.3.2.1.2 – Posição Vertical

4.3.2.1.2.1 – Resultados

- **Caso B111 / Caso B211**

Para o módulo útil, os provetes 1C (0.025 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) e 7C (0.15 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) possuem um comportamento similar. Para a temperatura ambiente o valor do módulo útil do provete 7C é inferior ao do provete 1C. Para a temperatura final de teste, o valor do módulo útil em ambos os provetes é similar (Figura 4.15 e Tabela 4.29).

À temperatura ambiente, o provete 7C possui valores de módulo perdido inferiores. Entre a temperatura ambiente e a temperatura de transição vítrea, o valor do módulo perdido é similar. O provete 7C tem um pico de E'' cerca de 10% inferior relativamente ao provete 1C. Após a temperatura de transição vítrea, verifica-se que a diferença de valores entre os provetes vai reduzindo lentamente, com o provete 1C a ter valores superiores, até a temperatura final de teste onde os valores finais são muito próximos (Figura 4.15 e Tabela 4.29).

Para valores de temperatura ambiente ambos os provetes possuem valores de $\tan \delta$ similares. Entre a temperatura de 50°C e a temperatura do pico de $\tan \delta$, o valor de $\tan \delta$ do provete 7C é superior à do provete 1C. O pico de $\tan \delta$ do provete 7C é igualmente superior. A partir da temperatura do pico de $\tan \delta$ até a temperatura final de teste, o provete 7C mantém-se com valor de $\tan \delta$ superior, mas reduzindo lentamente até terem, na temperatura final de teste, valores similares (Figura 4.15 e Tabela 4.29).

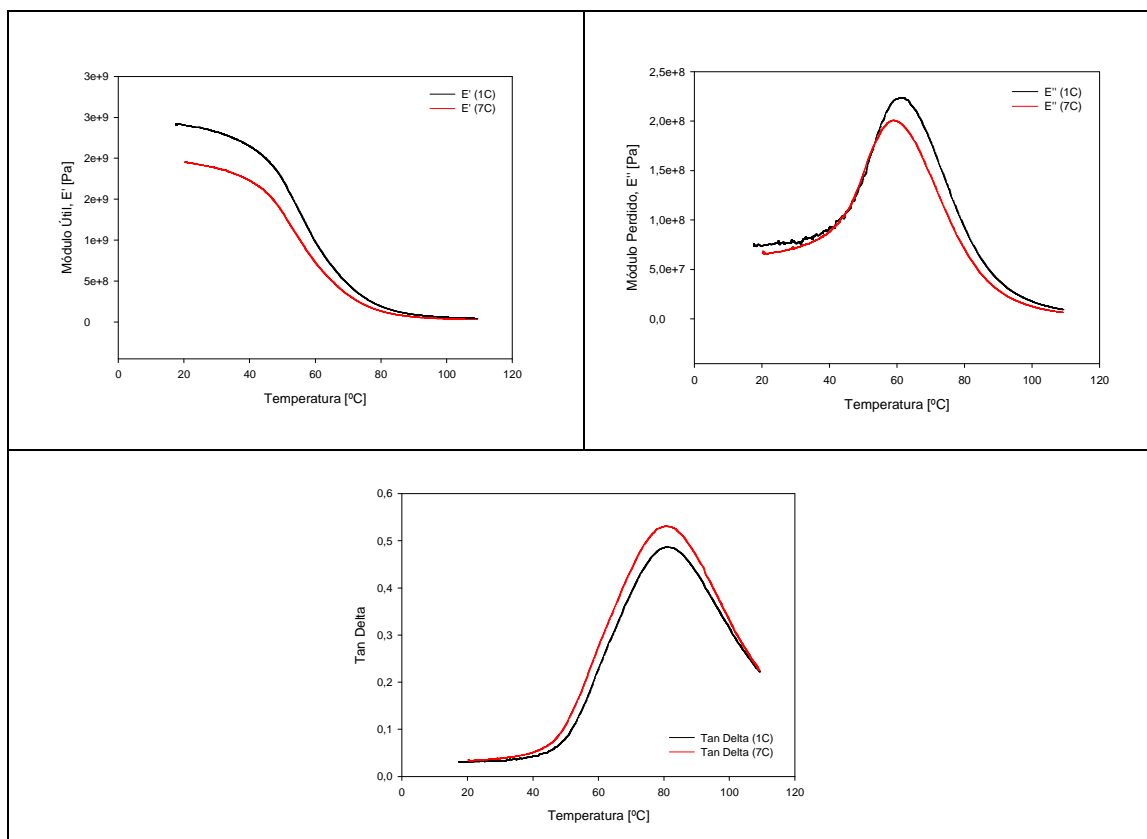


Figura 4. 15 - Caso B111 (1C) versus Caso B211 (7C): Influência da distância de varrimento nos provetes 1C (distância de varrimento 0.025 mm) e 7C (distância de varrimento 0.15 mm)

Tabela 4. 29 - Resultados obtidos para os provetes 1C e 7C

Profundidade Cura 0,100 Com Pós-Cura Posição Vertical $R_{1C} = R_{7C}$	Provete	Posição				
			Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
Distancia Varrimento 0,025	1C	Temp. [°C]	23,09	62,05	80,78	104,93
		E' [Pa]	2,38E+09	8,47E+08	1,78E+08	4,77E+07
		E'' [Pa]	7,55E+07	2,23E+08	8,66E+07	1,24E+07
		Tan Delta	0,0317	0,2638	0,4868	0,2605
Distancia Varrimento 0,150	7C	Temp. [°C]	23,10	58,90	80,41	104,78
		E' [Pa]	1,93E+09	7,84E+08	1,27E+08	3,24E+07
		E'' [Pa]	6,69E+07	2,01E+08	6,77E+07	8,81E+06
		Tan Delta	0,0346	0,2557	0,5310	0,2715

- **Caso B112 / Caso B212**

Os provetes 1D (0.025 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) e 7D (0.15 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) possuem um comportamento similar ao observado no caso B111 / B211 para o módulo útil (Figura 4.16 e Tabela 4.30). Para o módulo perdido, o comportamento dos provetes 1D e 7D é similar ao do caso B111 / B211, com exceção que à temperatura ambiente os valores são similares (Figura 4.16 e Tabela 4.30). Para $\tan \delta$ o comportamento dos provetes 1D e 7D é similar ao observado para os casos B111 / B211, com exceção dos valores entre a temperatura do pico de $\tan \delta$ e a temperatura final de teste em que o provete 1D possui valor de $\tan \delta$ superior (Figura 4.16 e Tabela 4.30).

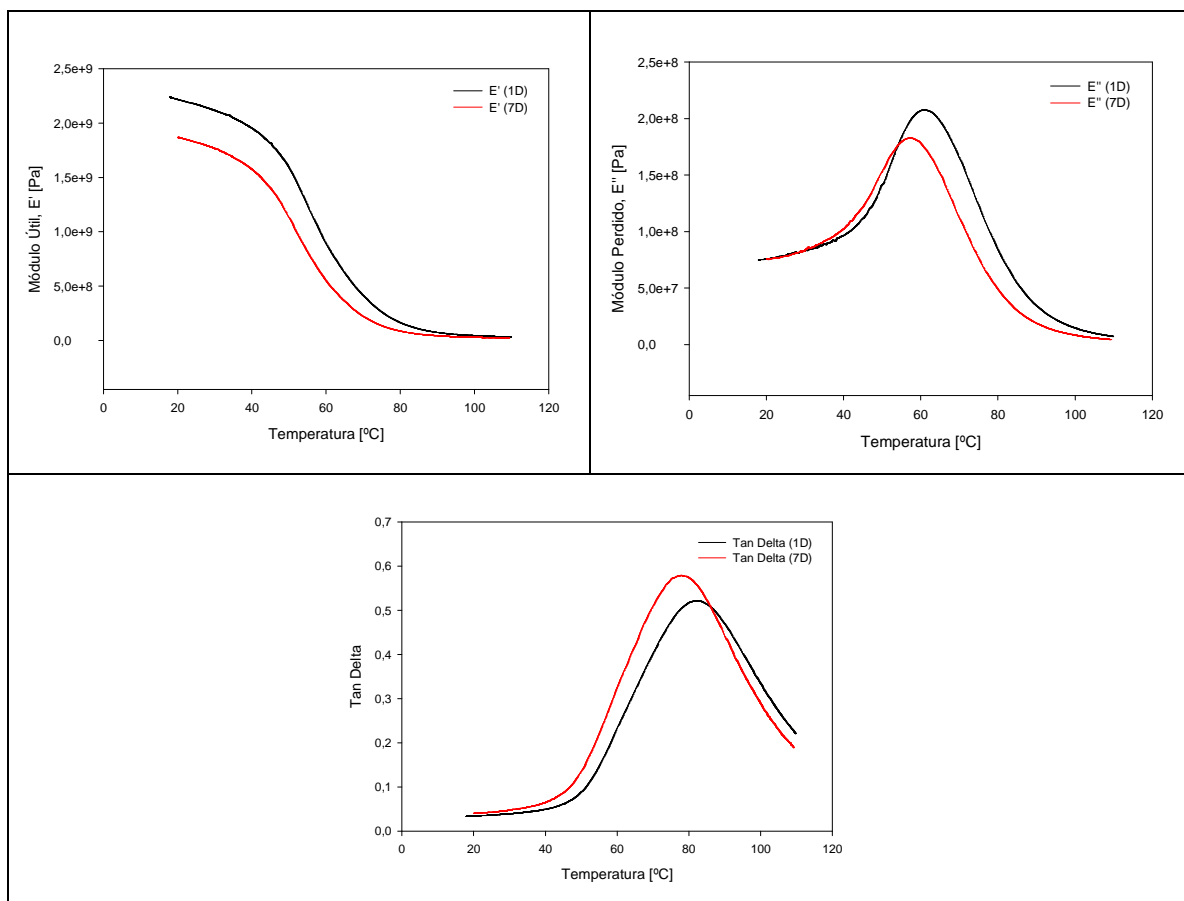


Figura 4. 16 - Caso B112 (1D) versus Caso B212 (7D): Influência da distância de varrimento nos provetes 1D (distância de varrimento 0.025 mm) e 7D (distância de varrimento 0.15 mm)

Tabela 4. 30 - Resultados obtidos para os provetes 1D e 7D

Profundidade Cura 0,100 Sem Pós-Cura Posição Vertical $R_{1D} = R_{7D}$	Provete	Posição				
		Temp. [°C]	Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
Distancia Varrimento 0,025	1D	Temp. [°C]	23,06	60,94	82,74	105,06
		E' [Pa]	2,19E+09	8,33E+08	1,28E+08	3,66E+07
		E'' [Pa]	7,78E+07	2,08E+08	6,67E+07	9,84E+06
		Tan Delta	0,0355	0,2492	0,5210	0,2691
Distancia Varrimento 0,150	7D	Temp. [°C]	23,10	57,19	77,96	104,78
		E' [Pa]	1,84E+09	6,88E+08	1,01E+08	2,53E+07
		E'' [Pa]	7,67E+07	1,83E+08	5,87E+07	5,85E+06
		Tan Delta	0,0417	0,2656	0,5784	0,2308

- **Caso B131 / Caso B231**

À temperatura ambiente o provete 9C (0.15 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) apresenta um valor inicial de módulo útil superior ao provete 3C (0.025 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) tal como se pode observar na Figura 4.17 e na Tabela 4.31. Para a temperatura ambiente o valor do módulo útil do provete 9C é igualmente superior. Entre a temperatura ambiente e 40°C, o valor do módulo útil é maior para o provete 9C, diminuindo e passando mesmo a ser inferior ao do provete 3C após os 40°C até a temperatura final de teste.

Para a temperatura ambiente até a temperatura de transição vítrea, o valor do módulo perdido do provete 9C é superior ao do provete 3C. O provete 9C tem um pico de E'' igualmente superior (Figura 4.17 e Tabela 4.31). Após a temperatura de transição vítrea até a temperatura de 90°C o provete 9C possui valor inferior (constante) ao do provete 3C. Entre 90°C e a temperatura final de teste, a diferença entre os valores do módulo perdido vão-se reduzindo, mas o provete 9C matem-se sempre com valores inferiores.

Para valores de temperatura ambiente ambos os provetes possuem valores de $\tan \delta$ similares (Figura 4.17 e Tabela 4.31). Entre a temperatura de 50°C e a temperatura do pico de $\tan \delta$, o valor de $\tan \delta$ do provete 9C é superior ao do provete 3C. O pico de $\tan \delta$ do provete 9C é cerca de 10% superior ao do provete 3C. Da temperatura do pico de $\tan \delta$ até a temperatura final de teste, o valor de $\tan \delta$ do provete 9C diminui mais rapidamente, sendo inferior ao do provete 3C.

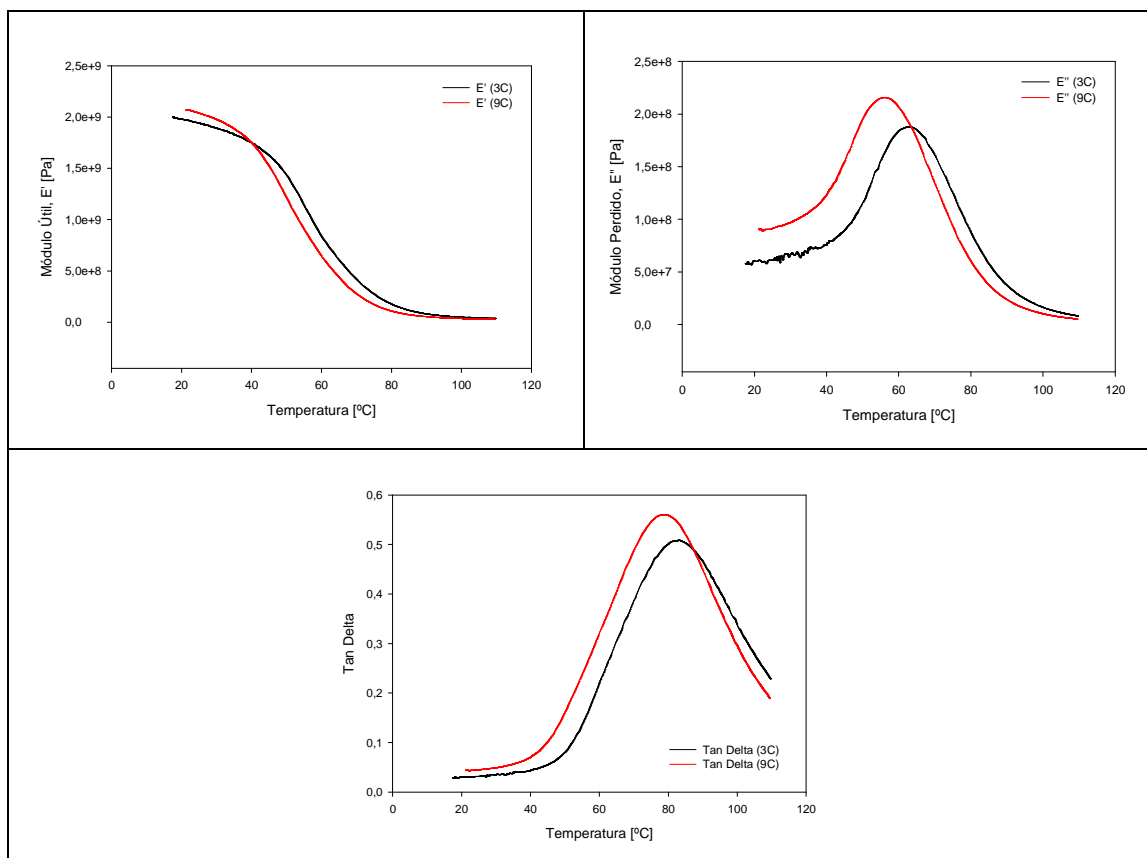


Figura 4. 17 - Caso B131 (3C) versus Caso B231 (9C): Influência da distância de varrimento nos provetes 3C (distância de varrimento 0,025 mm) e 9C (distância de varrimento 0,15 mm)

Tabela 4. 31 - Resultados obtidos para os provetes 3C e 9C

Profundidade Cura 0,225 Com Pós-Cura Posição Vertical R _{3C} = R _{9C}	Provete		Posição			
			Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
Distancia Varrimento 0,025	3C	Temp. [°C]	22,79	62,90	82,99	104,96
		E' [Pa]	1,96E+09	6,99E+08	1,35E+08	4,06E+07
		E'' [Pa]	5,98E+07	1,88E+08	6,85E+07	1,13E+07
		Tan Delta	0,0305	0,2690	0,5089	0,2775
Distancia Varrimento 0,150	9C	Temp. [°C]	22,98	56,26	78,51	104,95
		E' [Pa]	2,06E+09	8,36E+08	1,23E+08	3,04E+07
		E'' [Pa]	9,03E+07	2,16E+08	6,88E+07	7,10E+06
		Tan Delta	0,0438	0,2581	0,5603	0,2336

- Caso B132 / Caso B231**

No caso dos provetes 3D (0,025 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) e 9D (0,15 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) observa-se um comportamento similar ao observado anteriormente nos casos B131 / A211 (Figura 4.18 e Tabela 4.32).

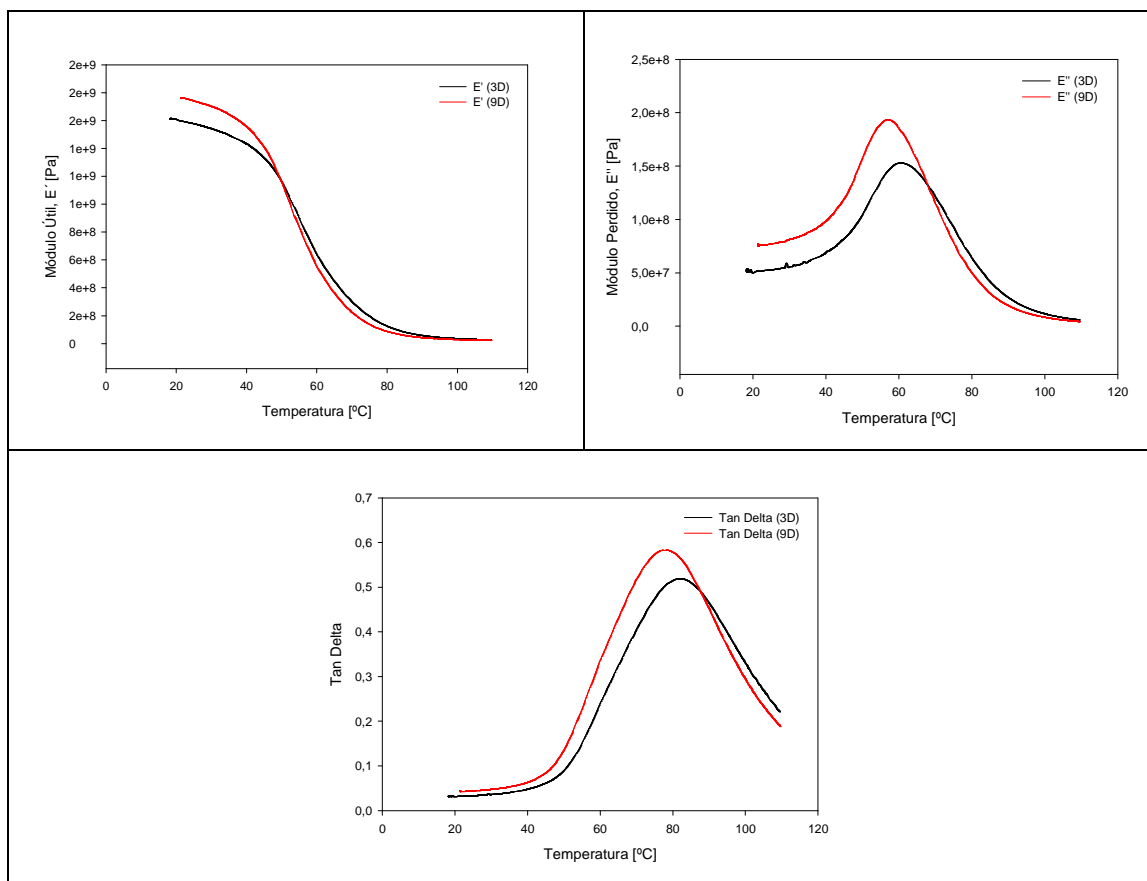


Figura 4. 18 - Caso B132 (3D) versus Caso B232 (9D): Influência da distância de varrimento nos provetes 3D (distância de varrimento 0.025 mm) e 9D (distância de varrimento 0.15 mm)

Tabela 4. 32 - Resultados obtidos para os provetes 3D e 9D

Profundidade Cura 0,225 Sem Pós-Cura Posição Vertical $R_{3D} = R_{9D}$	Provete	Posição				
			Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
Distancia Varrimento 0,025	3D	Temp. [°C]	23,20	60,79	82,24	104,94
		E' [Pa]	1,59E+09	6,04E+08	1,03E+08	3,00E+07
		E'' [Pa]	5,23E+07	1,53E+08	5,32E+07	8,07E+06
		Tan Delta	0,0329	0,2530	0,5184	0,2689
Distancia Varrimento 0,150	9D	Temp. [°C]	22,78	56,55	78,26	105,04
		E' [Pa]	1,76E+09	7,38E+08	1,01E+08	2,50E+07
		E'' [Pa]	7,60E+07	1,93E+08	5,88E+07	5,81E+06
		Tan Delta	0,0433	0,2620	0,5826	0,2321

- Caso B121 / Caso B221**

Para os provetes 3C (0.025 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) e 8C (0.15 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) é possível observar-se um comportamento semelhante ao dos casos B131 / B231 e B132 / B231 (Figura 4.19 e Tabela 4.33).

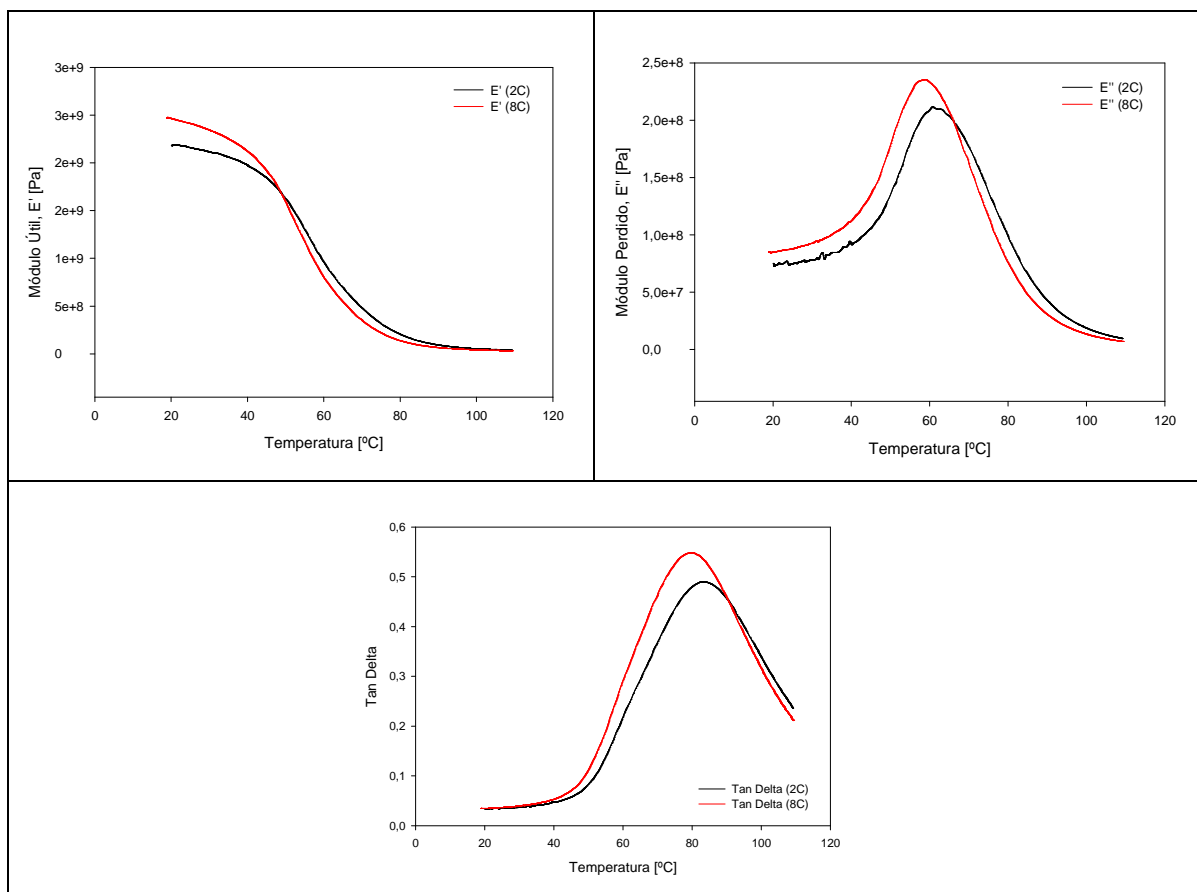


Figura 4. 19 - Caso B121 (2C) versus Caso B221 (8C): Influência da distância de varrimento nos provetes 2C (distância de varrimento 0.025 mm) e 8C (distância de varrimento 0.15 mm)

Tabela 4. 33 - Resultados obtidos para os provetes 2C e 8C

Profundidade Cura 0,500 Com Pós-Cura Posição Vertical $R_{2C} = R_{8C}$	Proвете	Posição				
			Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
Distancia Varrimento 0,025	2C	Temp. [°C]	22,89	60,61	82,41	105,05
		E' [Pa]	2,18E+09	9,23E+08	1,67E+08	4,60E+07
		E'' [Pa]	7,56E+07	2,12E+08	8,16E+07	1,28E+07
		Tan Delta	0,0347	0,2292	0,4897	0,2788
Distancia Varrimento 0,150	8C	Temp. [°C]	22,88	58,75	80,04	105,18
		E' [Pa]	2,43E+09	8,84E+08	1,38E+08	3,66E+07
		E'' [Pa]	8,67E+07	2,35E+08	7,54E+07	9,28E+06
		Tan Delta	0,0357	0,2665	0,5480	0,2532

- Caso B122 / Caso B222**

O resultados indicados na Figura 4.20 e Tabela 4.34 mostram que o valor inicial do módulo útil do provete 8D (0.15 mm de espaçamento entre linhas de varrimento) é superior que o valor do módulo útil observado para o provete 2D (0.025 mm de

espaçamento entre linhas de varrimento) Entre a temperatura ambiente e a temperatura de transição vítrea, o módulo útil do provete 8D é igualmente superior. Entre a temperatura de transição vítrea e a temperatura final de teste, os valores do módulo útil são similares. Comportamento idêntico pode ser observado para o módulo perdido, com o provete 8D a apresentar valores superiores à temperatura ambiente (Figura 4.20 e Tabela 4.34). Os valores de $\tan \delta$ para a temperatura ambiente em ambos os provetes são similares. Entre a temperatura de 50°C e a temperatura do pico de $\tan \delta$, o valor de $\tan \delta$ do provete 8D é superior ao do provete 2D. O pico de $\tan \delta$ do provete 8D é igualmente superior. Entre a temperatura de transição vítrea e a temperatura final de teste, os valores de $\tan \delta$ são similares (Figura 4.20 e Tabela 4.34).

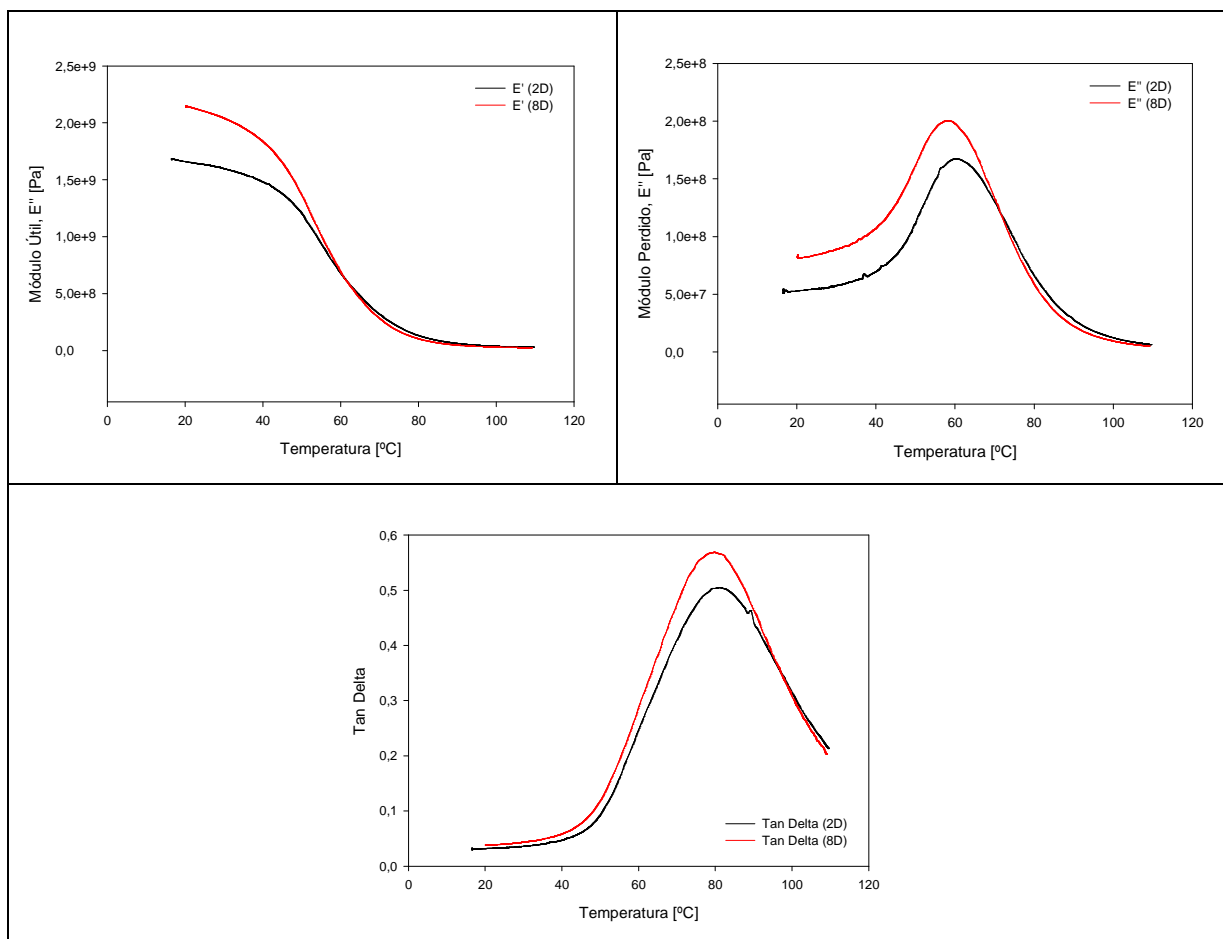


Figura 4. 20 - Caso B122 (2D) versus Caso B222 (8D): Influência da distância de varrimento nos provetes 2D (distância de varrimento 0.025 mm) e 8D (distância de varrimento 0.15 mm)

Tabela 4. 34 - Resultados obtidos para os provetes 2D e 8D

Profundidade Cura 0,500 Sem Pós-Cura Posição Vertical $R_{2D} = R_{8D}$	Provete	Posição				
			Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
Distancia Varrimento 0,025	2D	Temp. [°C]	23,09	60,19	81,26	104,98
		E' [Pa]	1,64E+09	6,69E+08	1,18E+08	3,32E+07
		E'' [Pa]	5,41E+07	1,67E+08	5,96E+07	8,53E+06
		Tan Delta	0,0330	0,2500	0,5048	0,2567
Distancia Varrimento 0,150	8D	Temp. [°C]	23,19	57,98	79,84	104,89
		E' [Pa]	2,12E+09	8,13E+08	1,04E+08	2,66E+07
		E'' [Pa]	8,27E+07	2,00E+08	5,93E+07	6,54E+06
		Tan Delta	0,0391	0,2461	0,5686	0,2458

4.3.2.1.2.2 – Comparação de resultados

- **Módulo útil à temperatura ambiente**

À temperatura ambiente, o aumento do espaçamento entre linhas de varrimento para valores de profundidade de cura baixas (0.1 mm) resulta numa diminuição do valor do módulo útil e para valores de profundidade de cura média (0.225 mm) ou alta (0.5 mm) resulta num aumento do módulo útil (Tabela 4.35).

Tabela 4. 35 - Resultados globais obtidos para o módulo útil à temperatura ambiente

Caso	Distancia Varrimento		Profundidade de cura	Pós-Cura	Módulo Útil E' [Pa]		Diferença	%
	0.025	0.15						
B111 versus B211	1C	7C	0.1	Sim	2,38E+09	1,93E+09	-4,46E+08	-18,74
B112 versus B212	1D	7D	0.1	Não	2,19E+09	1,84E+09	-3,47E+08	-15,87
B131 versus B231	3C	9C	0.225	Sim	1,96E+09	2,06E+09	1,02E+08	5,20
B132 versus B232	3D	9D	0.225	Não	1,59E+09	1,76E+09	1,70E+08	10,70
B121 versus B221	2C	8C	0.5	Sim	2,18E+09	2,43E+09	2,56E+08	11,78
B122 versus B222	2D	8D	0.5	Não	1,64E+09	2,12E+09	4,76E+08	28,97

- **Módulo perdido à temperatura ambiente**

À temperatura ambiente, o módulo perdido têm o mesmo comportamento do módulo útil (Tabela 4.36), diminuindo para valores de profundidade de cura baixa (0.1 mm) e aumentando para valores de profundidade de cura médias (0.225 mm) e altas (0.5 mm).

Tabela 4. 36 - Resultados globais obtidos para o módulo perdido à temperatura ambiente

Caso	Distancia Varrimento		Profundidade de cura	Pós-Cura	Módulo Perdido E'' [Pa]		Diferença	%
	0.025	0.15						
B111 versus B211	1C	7C	0.1	Sim	7,55E+07	6,69E+07	-8,53E+06	-11,30
B112 versus B212	1D	7D	0.1	Não	7,78E+07	7,67E+07	-1,04E+06	-1,33
B131 versus B231	3C	9C	0.225	Sim	5,98E+07	9,03E+07	3,04E+07	50,87
B132 versus B232	3D	9D	0.225	Não	5,23E+07	7,60E+07	2,37E+07	45,41
B121 versus B221	2C	8C	0.5	Sim	7,56E+07	8,67E+07	1,12E+07	14,76
B122 versus B222	2D	8D	0.5	Não	5,41E+07	8,27E+07	2,86E+07	52,83

- **Módulo perdido à temperatura de transição vítrea**

O módulo perdido à temperatura de transição vítrea tem o mesmo comportamento que possuía à temperatura ambiente (Tabela 4.37).

Tabela 4. 37 - Resultados globais obtidos para o módulo perdido à temperatura de transição vítrea

Caso	Distancia Varrimento		Profundidade de cura	Pós-Cura	Módulo Perdido E'' [Pa]		Diferença	%
	0.025	0.15						
B111 versus B211	1C	7C	0.1	Sim	2,23E+08	2,01E+08	-2,29E+07	-10,25
B112 versus B212	1D	7D	0.1	Não	2,08E+08	1,83E+08	-2,49E+07	-11,98
B131 versus B231	3C	9C	0.225	Sim	1,88E+08	2,16E+08	2,77E+07	14,76
B132 versus B232	3D	9D	0.225	Não	1,53E+08	1,93E+08	4,04E+07	26,42
B121 versus B221	2C	8C	0.5	Sim	2,12E+08	2,35E+08	2,39E+07	11,32
B122 versus B222	2D	8D	0.5	Não	1,67E+08	2,00E+08	3,30E+07	19,75

- **Tan Delta à temperatura do pico de tan delta**

O aumento do espaçamento entre linhas de varrimento resulta num aumento dos valores do pico de tan δ à temperatura do pico de tan δ em cerca de 11% (Tabela 4.38).

Tabela 4. 38 - Resultados globais obtidos para tan delta à temperatura do pico de tan delta

Caso	Distancia Varrimento		Profundidade de cura	Pós-Cura	Tan Delta		Diferença	%
	0.025	0.15						
B111 versus B211	1C	7C	0.1	Sim	0,4868	0,5310	0,0442	9,08
B112 versus B212	1D	7D	0.1	Não	0,5210	0,5784	0,0573	11,01
B131 versus B231	3C	9C	0.225	Sim	0,5089	0,5603	0,0514	10,10
B132 versus B232	3D	9D	0.225	Não	0,5184	0,5826	0,0642	12,38
B121 versus B221	2C	8C	0.5	Sim	0,4897	0,5480	0,0583	11,91
B122 versus B222	2D	8D	0.5	Não	0,5048	0,5686	0,0638	12,64

4.3.2.2– Temperatura de transição vítrea

As Tabelas 4.39 e 4.40 apresentam os resultados obtidos em termos de temperatura de transição vítrea em provetes produzidos com diferentes distâncias de espaçamento entre linhas de varrimento, distintas orientações de fabricação com e sem operações de pós-cura. Os resultados mostram que o aumento da distância de espaçamento entre linhas de varrimento corresponde a uma diminuição da temperatura de transição vítrea. Tal deve-se, neste caso ao facto de se diminuir o grau de sobreposição entre feixes de incidência o que origina uma diminuição da percentagem total de material curado

Tabela 4. 39 - Variação da temperatura de transição vítrea, função da distância entre linhas de varrimento em provetes construídos na posição horizontal

Caso	Provetes		Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento			Tg [°C]		Diferença	%
A111 / A211	1A	7A	Sim	0.1	0.025	0.15	$R_{1A} = R_{7A}$	65,53	57,95	7,58	-11,56
A112 / A212	1B	7B	Não	0.1	0.025	0.15	$R_{1B} = R_{7B}$	62,18	57,26	4,91	-7,90
A131 / A231	3A	9A	Sim	0.225	0.025	0.15	$R_{3A} = R_{9A}$	64,29	57,24	7,05	-10,97
A132 / A232	3B	9B	Não	0.225	0.025	0.15	$R_{3B} = R_{9B}$	62,11	55,94	6,18	-9,94
A121 / A221	2A	8A	Sim	0.5	0.025	0.15	$R_{2A} = R_{8A}$	63,19	59,29	3,90	-6,17
A122 / A222	2B	8B	Não	0.5	0.025	0.15	$R_{2B} = R_{8B}$	62,85	58,69	4,16	-6,62

Tabela 4. 40 - Variação da temperatura de transição vítrea, função da distância entre linhas de varrimento em provetes construídos na posição vertical

Caso	Provetes		Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento			Tg [°C]		Diferença	%
B111 / B211	1C	7C	Sim	0.1	0.025	0.15	$R_{1C} = R_{7C}$	62,05	58,90	3,15	-5,08
B112 / B212	1D	7D	Não	0.1	0.025	0.15	$R_{1D} = R_{7D}$	60,94	57,19	3,75	-6,15
B131 / B231	3C	9C	Sim	0.225	0.025	0.15	$R_{3C} = R_{9C}$	62,90	56,26	6,64	-10,55
B132 / B232	3D	9D	Não	0.225	0.025	0.15	$R_{3D} = R_{9D}$	60,79	56,55	4,24	-6,97
B121 / B221	2C	8C	Sim	0.5	0.025	0.15	$R_{2C} = R_{8C}$	60,61	58,75	1,86	-3,07
B122 / B222	2D	8D	Não	0.5	0.025	0.15	$R_{2D} = R_{8D}$	60,19	57,98	2,21	-3,68

4.3.3 – Caso III: Efeito da influência da humidade nas propriedades mecânicas

4.3.3.1 – Propriedades mecânicas

• Caso A111 – Exposição de curta duração

Para provetes construídos na posição horizontal, usando-se uma profundidade de cura de 0.1 mm, uma distância entre linhas de varrimento de 0.025 mm e operações de pós-cura, verificou-se um comportamento semelhante para as três situações de exposição (não exposição, três e seis horas de exposição à humidade) (Figura 4.21 e Tabela 4.41). Para a temperatura ambiente, após exposição à humidade durante 3 horas, verifica-se que o valor do módulo útil sofre uma redução de cerca de 5%. Entre os 40°C e os 90°C o valor do módulo útil é semelhante para os casos de exposição de três e seis horas, sendo inferior ao valor do provetes que não foram submetidos a exposição à humidade. De forma distinta, verifica-se que à temperatura ambiente, a exposição durante três horas à humidade aumenta o valor do módulo perdido. Contudo a exposição adicional de mais três horas reduziu esse mesmo valor em cerca de 15%. As três primeiras horas de exposição não aumentaram o valor do módulo perdido à temperatura de transição vítrea, enquanto que as segundas três horas provocaram um aumento do pico do módulo perdido. Entre T_g e a temperatura final de teste, os valores obtidos são similares.

Os resultados indicados na Figura 4.21 e Tabela 4.41 mostram igualmente que $\tan \delta$ à temperatura ambiente possui valores similares nos três casos de exposição. Aumentando a temperatura, os valores de $\tan \delta$ são similares. Entre a temperatura ambiente, a temperatura do pico de $\tan \delta$, os valores são superiores ao do teste que não foi submetido a exposição à humidade. O pico de $\tan \delta$ após a exposição à humidade durante 3 horas baixa cerca de 5% e volta a aumentar ligeiramente (1.82%) após mais 3 horas de exposição. Após a temperatura do pico de $\tan \delta$ até a temperatura final de teste, os seus valores passam a ser inferiores.

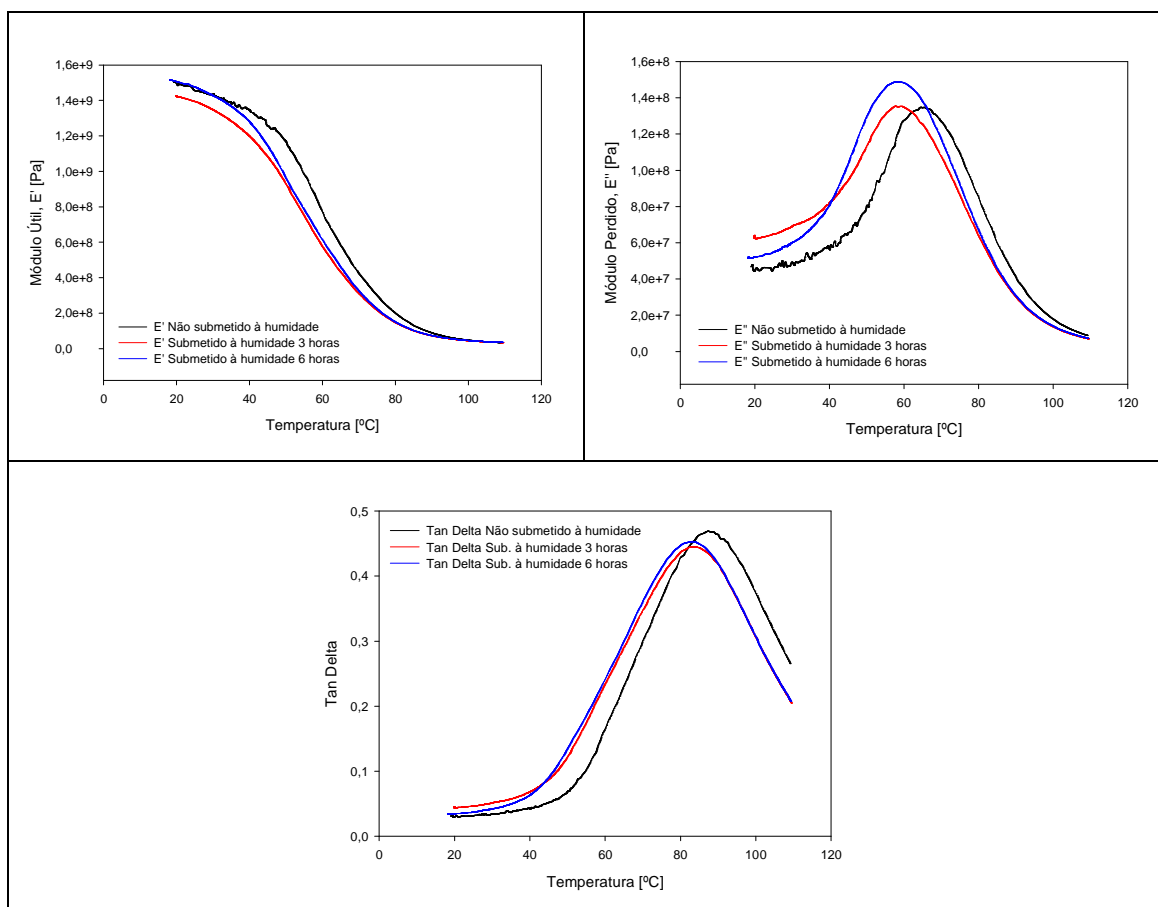


Figura 4. 21 - Influência da exposição à humidade (provet 1A) executado na posição horizontal, com distância de varrimento 0.025 mm, profundidade de cura 0.1 e submetido a operação de pós-cura

Tabela 4. 41 - Resultados obtidos com o provete 1A nos testes de exposição à humidade

	Provete	Posição				
			Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
Distancia Varrimento 0,025 Profundidade Cura 0,1 Com Pós-Cura Posição Horizontal	0 Horas	Temp. [°C]	23,61	65,53	87,36	105,14
		E' [Pa]	1,48E+09	5,66E+08	1,08E+08	3,81E+07
		E'' [Pa]	4,61E+07	1,35E+08	5,07E+07	1,19E+07
		Tan Delta	0,0312	0,2380	0,4690	0,3112
	3 Horas	Temp. [°C]	22,63	58,96	83,43	104,90
		E' [Pa]	1,41E+09	6,10E+08	1,13E+08	3,80E+07
		E'' [Pa]	6,33E+07	1,35E+08	5,04E+07	9,52E+06
		Tan Delta	0,0450	0,2217	0,4451	0,2503
	6 Horas	Temp. [°C]	23,01	58,44	83,29	104,73
		E' [Pa]	1,49E+09	6,65E+08	1,17E+08	3,92E+07
		E'' [Pa]	5,38E+07	1,49E+08	5,28E+07	9,90E+06
		Tan Delta	0,0360	0,2238	0,4532	0,2526

O valor do módulo útil à temperatura ambiente diminui nas três primeiras horas de exposição à humidade e depois aumenta para valores similares ao inicial nas segundas três horas de exposição (Tabela 4.42).

Tabela 4. 42 - Variação do módulo útil à temperatura ambiente, função do tempo de exposição à humidade (provete 1A)

Tempo Exposição	Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Posição	Módulo Útil E' [Pa]		
O Horas	Sim	0.1	0.025	Horizontal	1.48E+09	Diferença	%
3 Horas					1.41E+09	-7.08E+07	-4.78
6 Horas					1.49E+09	8.52E+07	6.05

O valor do módulo perdido aumenta à temperatura ambiente nas três primeiras horas de exposição à humidade, e depois volta a diminuir após ser submetido a outras três horas de exposição (Tabela 4.43).

Tabela 4. 43 - Variação do módulo perdido à temperatura ambiente, função do tempo de exposição à humidade (provete 1A)

Tempo Exposição	Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Posição	Módulo Útil E' [Pa]		
O Horas	Sim	0.1	0.025	Horizontal	4.61E+07	Diferença	%
3 Horas					6.33E+07	-1.72E+07	37.36
6 Horas					5.38E+07	9.59E+06	-15.14

O valor do módulo perdido à temperatura de transição vítrea não sofre alteração nas três primeiras horas de exposição à humidade, e depois aumenta nas segundas três horas (Tabela 4.44).

Tabela 4. 44 - Variação do módulo perdido à temperatura de transição vítrea, função do tempo de exposição à humidade (provete 1A)

Tempo Exposição	Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Posição	Módulo Útil E' [Pa]		
O Horas	Sim	0.1	0.025	Horizontal	1.35E+08	Diferença	%
3 Horas					1.35E+08	6.69E+05	0.50
6 Horas					1.49E+08	1.36E+07	10.03

O valor do pico de $\tan \delta$ diminui após três horas de exposição à humidade e nas segundas três horas não sofre alterações significativas (ver tabela 4.45).

Tabela 4. 45 - Variação de tan delta à temperatura do pico de tan delta, função do tempo de exposição à humidade (provete 1A)

Tempo Exposição	Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Posição	Módulo Útil E' [Pa]		
O Horas	Sim	0.1	0.025	Horizontal	0.4690	Diferença	%
3 Horas					0.4451	-0.0239	-5.09
6 Horas					0.4532	0.0081	1.82

- **Caso A112 – Exposição de longa duração**

Para provetes construídos na posição horizontal, usando-se uma profundidade de cura de 0.1 mm, uma distância entre linhas de varrimento de 0.025 mm sem operações de pós-cura, verifica-se que o módulo útil para casos de exposição de 24 horas e 48 horas é similar, e que o seu valor se reduz consideravelmente em valor médio relativamente à situação de não exposição à humidade (Figura 4.22 e Tabela 4.46). Para a situação de exposição à humidade durante 168 horas verifica-se que a redução do módulo útil é tão grande que o provete perde todas as suas características de resistência à carga ficando inútil para aplicações de engenharia, tendo em comparação com o valor inicial de não exposição à temperatura, uma redução de cerca de 77%.

O módulo perdido à temperatura ambiente, para os casos de exposição de 24 horas e 48 horas é similar, e o seu valor é maior em relação ao caso de não exposição (Figura 4.21 e Tabela 4.46). Para o caso de exposição de 168 horas o valor do módulo perdido à temperatura ambiente reduz-se para um valor inferior ao caso de não exposição, sendo inferior em cerca de 22% em relação ao valor de não exposição e cerca de 49% inferior em relação ao valor da média da exposição de 24 e 48 horas de exposição. A curva do E'' para exposição a 168 horas tem um comportamento atípico (dois picos) entre a temperatura ambiente e a temperatura de transição vítrea. O valor do pico de E'' para a exposição durante 24 horas reduz-se em cerca de 13% em relação ao caso de não

exposição, verificando-se o mesmo em relação a T_g . Vinte e quatro horas de exposição adicionais à humidade resultam no aumento (sentido inverso em relação às primeiras 24 horas) do valor do pico de E'' , continuando T_g a diminuir. Entre a T_g e a temperatura final de teste, verifica-se que o valor de E'' diminui com o aumento da exposição à humidade, sendo os valores do caso de 24 e de 48 horas similares. Para a temperatura final de teste, os valores de E'' são similares.

À temperatura ambiente, o valor de $\tan \delta$ aumenta com o tempo de exposição à humidade (a exposição de 24 e 48 horas possuem valores similares) (Figura 4.22 e Tabela 4.46). O aumento médio é de cerca de 67% do caso de não exposição para 24/48 horas de exposição, e de 109% quando se passa de uma exposição de 24/48 horas para 168 Horas. No caso de não exposição à humidade e uma exposição de 168 horas verifica-se que $\tan \delta$ aumenta cerca de 249%. Entre a temperatura ambiente e a temperatura do pico de $\tan \delta$, o valor de $\tan \delta$ aumenta à medida que aumenta o tempo de exposição à humidade. Entre o caso de não exposição à humidade e a exposição durante 168 horas, o valor do pico de $\tan \delta$ diminui cerca de 24%, sendo similar para os casos de 24 e 48 horas de exposição. Adicionalmente, o valor da temperatura do pico de $\tan \delta$ também diminui. Entre a temperatura do pico de $\tan \delta$ e a temperatura final de teste, os valores de $\tan \delta$ diminuem.

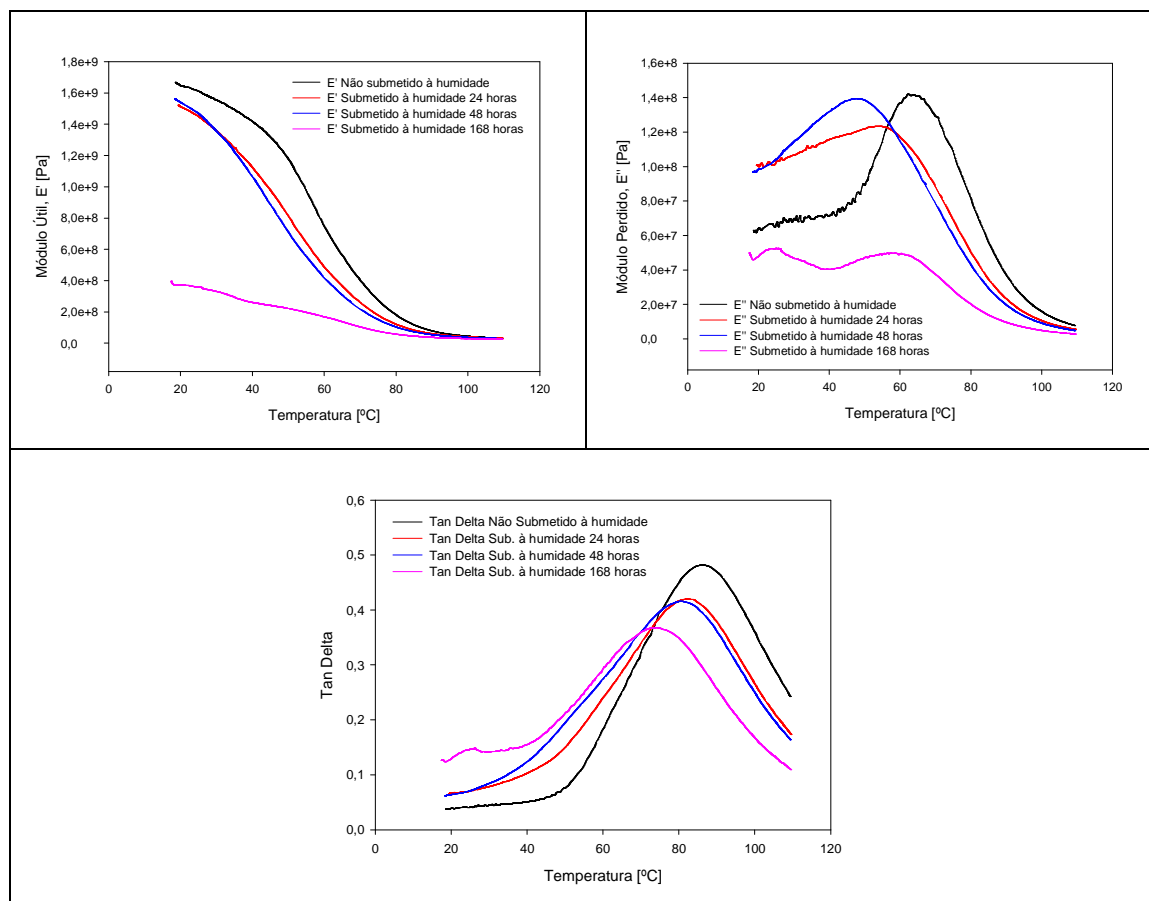


Figura 4. 22 - Influência da exposição à humidade (provete 1B) executado na posição horizontal, com distância de varrimento 0.025 mm, profundidade de cura 0.1 mm e não submetido a operação de pós-cura

Tabela 4. 46- Resultados obtidos com o provete 1B nos testes de exposição à humidade

			Posição			
			Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C
Distancia Varrimento 0,025 Profundidade Cura 0,1 Sem Pós-Cura Posição Horizontal	0 Horas	Temp. [°C]	23,08	62,18	86,35	105,16
		E' [Pa]	1,63E+09	6,60E+08	1,04E+08	3,61E+07
		E'' [Pa]	6,67E+07	1,42E+08	5,02E+07	1,05E+07
		Tan Delta	0,0410	0,2154	0,4818	0,2917
	24 Horas	Temp. [°C]	23,06	53,44	82,16	105,01
		E' [Pa]	1,48E+09	6,92E+08	1,03E+08	3,48E+07
		E'' [Pa]	1,02E+08	1,23E+08	4,32E+07	7,41E+06
		Tan Delta	0,0694	0,1782	0,4203	0,2126
	48 Horas	Temp. [°C]	22,78	47,50	80,23	105,19
		E' [Pa]	1,50E+09	7,98E+08	1,01E+08	3,22E+07
		E'' [Pa]	1,01E+08	1,39E+08	4,20E+07	6,38E+06
		Tan Delta	0,0673	0,1747	0,4158	0,1980
	168 Horas	Temp. [°C]	23,08	57,26	72,56	105,08
		E' [Pa]	3,66E+08	1,85E+08	8,89E+07	2,74E+07
		E'' [Pa]	5,23E+07	4,99E+07	3,26E+07	3,67E+06
		Tan Delta	0,1428	0,2702	0,3670	0,1341

Verifica-se que o módulo útil à temperatura ambiente diminui nas primeiras 48 horas cerca de 10% (entre as 24 e as 48 horas a diferença não é significativa), e depois diminui consideravelmente (-75%) até atingir as 168 horas de exposição (Tabela 4.47).

Tabela 4. 47 - Variação do módulo útil à temperatura ambiente, função do tempo de exposição à humidade (provete 1B)

Tempo Exposição	Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Posição	Módulo Útil E' [Pa]		
O Horas	Não	0.1	0.025	Horizontal	1.63E+09	Diferença	%
24 Horas					1.48E+09	-1.52E+08	-9.31
48 Horas					1.50E+09	2.60E+07	1.76
168 Horas					3.66E+08	-1.14E+09	-75.61

À temperatura ambiente o valor do módulo perdido aumenta 53.5% nas primeiras 24 horas de exposição à humidade (Tabela 4.48). Para uma exposição entre 24 horas e 48 horas, o valor do módulo perdido é similar. Quando a exposição à humidade atinge as 168 horas, o valor do módulo perdido diminui 48% em relação ao valor de 24/48 horas de exposição.

Tabela 4. 48 - Variação do módulo perdido à temperatura ambiente, função do tempo de exposição à humidade (provete 1B)

Tempo Exposição	Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Posição	Módulo Útil E' [Pa]		
O Horas	Não	0.1	0.025	Horizontal	6.67E+07	Diferença	%
24 Horas					1.02E+08	3.57E+07	53.51
48 Horas					1.01E+08	-1.34E+06	-1.31
168 Horas					5.23E+07	-4.88E+07	-48.28

Nas primeiras 24 horas de exposição à humidade, o valor do módulo perdido à temperatura de transição vítrea reduz-se em cerca de 13%, e após mais 24 horas de exposição aumenta 13% voltando a ter um valor similar ao inicial (não exposição à humidade). Após a exposição à humidade atingir as 168 horas, o valor do módulo perdido o valor do módulo perdido é reduzido em 48% (Tabela 4.49).

Tabela 4. 49 - Variação do módulo perdido à temperatura de transição vítrea, função do tempo de exposição à humidade (provete 1B)

Tempo Exposição	Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Posição	Módulo Útil E' [Pa]		
O Horas	Não	0.1	0.025	Horizontal	1.42E+08	Diferença	%
24 Horas					1.23E+08	-1.88E+07	-13.21
48 Horas					1.39E+08	1.61E+07	13.07
168 Horas					4.99E+07	-8.95E+07	-64.18

A exposição inicial de 24 horas à humidade implica uma redução de 13% no valor do pico de $\tan \delta$. Uma exposição adicional de 24 horas à humidade resulta numa

diminuição não significativa do valor do pico de $\tan \delta$. Se a exposição à humidade atingir as 168 horas então verifica-se uma redução de 12% em relação à exposição de 48 horas (Tabela 4.50).

Tabela 4. 50 - Variação de $\tan \delta$ à temperatura do pico de $\tan \delta$, função do tempo de exposição à humidade (provete 1B)

Tempo Exposição	Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Posição	Módulo Útil E' [Pa]		
O Horas	Não	0.1	0.025	Horizontal	0.4818	Diferença	%
24 Horas					0.4203	-0.0615	-12.77
48 Horas					0.4158	-0.0045	-1.06
168 Horas					0.3670	-0.0489	-11.75

- **Caso B111 – Exposição de longa duração**

Para provetes construídos na posição vertical, usando-se uma profundidade de cura de 0.1 mm, uma distância entre linhas de varrimento de 0.025 mm e operações de pós-cura, verifica-se para o módulo útil que este diminui com o aumento da temperatura, com uma pequena excepção que é o caso de exposição à humidade durante 168 horas, que possui menor valor (diferença mínima) à temperatura ambiente que o caso de exposição de 48 horas, mas somente durante um pequeno intervalo de temperatura (Figura 4.23 e Tabela 4.51). O valor do módulo útil à temperatura ambiente deste caso (exposição durante 168 horas) em comparação com o caso A112 (construído na posição horizontal e não submetido à operação de pós-cura) sofreu uma diminuição muito menor. O comportamento do módulo perdido é similar ao observado no caso A112, com excepção da situação de exposição à humidade durante 168 horas que em comparação com os casos de exposição de 24 e 48 horas, possui valor superior à temperatura ambiente e maior valor de pico de E'' . Para $\tan \delta$, o comportamento é semelhante ao observado no caso A112.

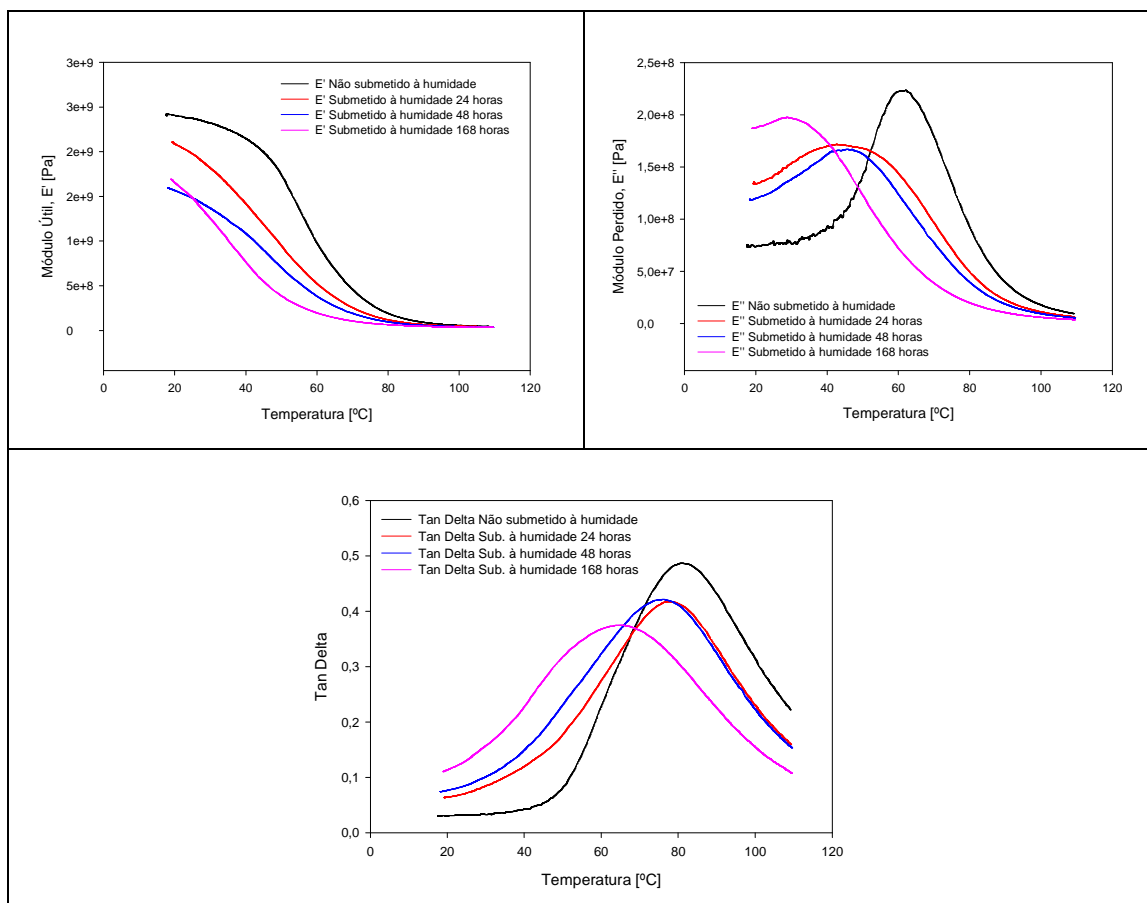


Figura 4. 23 - Influência da exposição à humidade (provete 1C) executado na posição vertical, com distância de varrimento 0.025 mm, profundidade de cura 0.1 mm e submetido a operação de pós-cura

Tabela 4. 51 - Resultados obtidos com o provete 1C nos testes de exposição à humidade

		Posição				
Provete		Tamb [°C]	Tg (pico E'')	Pico Tan Delta	T = 105°C	
Distancia Varrimento 0,025 Profundidade Cura 0,1 Com Pós-Cura Posição Vertical	0 Horas	Temp. [°C]	23,09	62,05	80,78	104,93
		E' [Pa]	2,38E+09	8,47E+08	1,78E+08	4,77E+07
		E'' [Pa]	7,55E+07	2,23E+08	8,66E+07	1,24E+07
		Tan Delta	0,0317	0,2638	0,4868	0,2605
	24 Horas	Temp. [°C]	22,70	42,60	77,26	105,21
		E' [Pa]	2,03E+09	1,29E+09	1,44E+08	4,34E+07
		E'' [Pa]	1,38E+08	1,72E+08	6,02E+07	8,11E+06
	48 Horas	Tan Delta	0,0678	0,1326	0,4173	0,1870
		Temp. [°C]	22,71	45,80	76,23	105,11
		E' [Pa]	1,52E+09	8,65E+08	1,22E+08	3,82E+07
		E'' [Pa]	1,23E+08	1,67E+08	5,15E+07	6,92E+06
		Tan Delta	0,0812	0,1930	0,4214	0,1813
	168 Horas	Temp. [°C]	22,96	28,60	64,59	105,04
		E' [Pa]	1,55E+09	1,31E+09	1,46E+08	3,56E+07
		E'' [Pa]	1,91E+08	1,98E+08	5,46E+07	4,53E+06
		Tan Delta	0,1230	0,1506	0,3747	0,1275

O módulo útil à temperatura ambiente diminui com a exposição à humidade até um tempo de 48 horas, após o qual se mantêm sensivelmente constante (Tabela 4.52).

Tabela 4. 52 - Variação do módulo útil à temperatura ambiente, função do tempo de exposição à humidade (provete 1C)

Tempo Exposição	Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Posição	Módulo Útil E' [Pa]		
O Horas	Não	0.1	0.025	Horizontal	2.38E+09	Diferença	%
24 Horas					2.03E+09	-3.51E+08	-14.76
48 Horas					1.52E+09	-5.10E+08	-25.12
168 Horas					1.55E+09	3.41E+07	2.24

O módulo perdido à temperatura ambiente aumenta consideravelmente (82%) nas primeiras 24 horas de exposição à humidade (Tabela 4.53). Depois, até as 48 horas, diminui em cerca de 10% e volta novamente a aumentar para a exposição à humidade durante 168 horas.

Tabela 4. 53 - Variação do módulo perdido à temperatura ambiente, função do tempo de exposição à humidade (provete 1C)

Tempo Exposição	Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Posição	Módulo Útil E' [Pa]		
O Horas	Não	0.1	0.025	Horizontal	7.55E+07	Diferença	%
24 Horas					1.38E+08	6.21E+07	82.34
48 Horas					1.23E+08	-1.42E+07	-10.33
168 Horas					1.91E+08	6.76E+07	54.81

O módulo perdido à temperatura de transição vítrea diminui nas primeiras 24 horas, mantendo-se depois estável durante as 24 horas de exposição seguintes (Tabela 4.54). Após 168 horas de exposição à humidade verifica-se uma diminuição do módulo perdido em cerca de 19%.

Tabela 4. 54 - Variação do módulo perdido à temperatura de transição vítrea, função do tempo de exposição à humidade (provete 1C)

Tempo Exposição	Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Posição	Módulo Útil E' [Pa]		
O Horas	Não	0.1	0.025	Horizontal	2.23E+08	Diferença	%
24 Horas					1.72E+08	-5.18E+07	-23.17
48 Horas					1.67E+08	-4.85E+06	-2.82
168 Horas					1.98E+08	3.07E+07	18.40

O valor do pico de $\tan \delta$ nas primeiras 24 horas de exposição à humidade diminui 14%, mantendo-se aproximadamente constante nas 24 horas de exposição seguintes, voltando a diminuir novamente para uma exposição de 168 horas (Tabela 4.55).

Tabela 4. 55 - Variação de tan delta à temperatura do pico de tan delta, função do tempo de exposição à humidade (provete 1C)

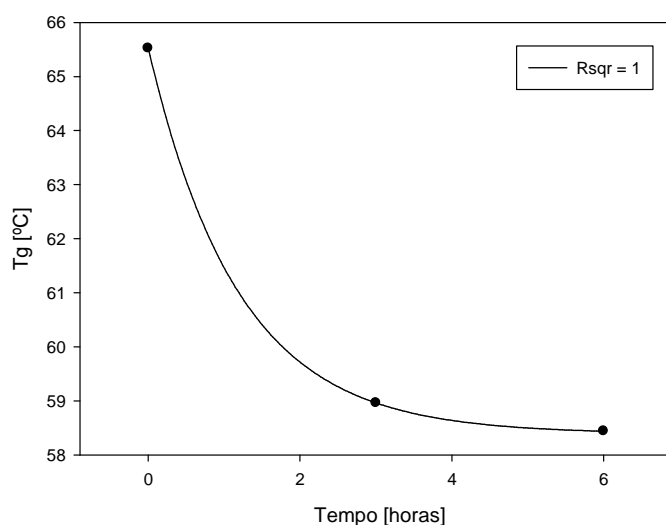
Tempo Exposição	Pós-Cura	Profund. Cura	Distancia Varrimento	Posição	Módulo Útil E' [Pa]		
O Horas	Não	0.1	0.025	Horizontal	0.4868	Diferença	%
24 Horas					0.4173	-0.0696	-14.28
48 Horas					0.4214	0.0042	1.00
168 Horas					0.3747	-0.0468	-11.09

4.3.3.2 – Temperatura de transição vítrea

Na Tabela 4.56 apresentam-se os resultados obtidos em termos de temperatura de transição vítrea em provetes submetidos à humidade em ensaios de curta duração (3 e 6 horas). Verifica-se que a queda do valor da temperatura de transição vítrea é grande nas primeiras 3 horas (cerca de 11%) (Figura 4.24), e que a permanência adicional durante mais 3 horas em ambiente húmido pouco influencia o valor da temperatura de transição vítrea.

Tabela 4. 56 - Variação de Tg com a exposição à humidade (provete 1A)

		Temperatura de transição vítrea [°C]			
		Provete	Provete não sujeito a humidade	Provete sujeito a humidade durante 3 horas	Provete sujeito a humidade durante 6 horas
Hatch Spacing 0,025		1A	65,53°C	58,96°C	58,44°C
Fill Cure Depth 0,1					
Posição Horizontal					
Com Pós-Cura					

**Figura 4. 24** - Variação de Tg em provete submetido a exposição à humidade (provete 1A)

A Tabela 4.57 apresenta os resultados obtidos em termos de temperatura de transição vítrea em provetes submetidos à humidade em ensaios de longa duração (24, 48 e 168 horas). Verifica-se que a queda do valor da temperatura de transição vítrea é muito significativa no caso do provete 1C submetido a operação de pós-cura.

Tabela 4. 57 - Variação de Tg com a exposição à humidade

Tg [°C]		Provete não sujeito a humidade	Provete sujeito a humidade durante 24 horas	Provete sujeito a humidade durante 48 horas	Provete sujeito a humidade durante 1 semana (168 horas)
Provete 1B	Hatch Spacing 0,025 Fill Cure Depth 0,1 Posição Horizontal Sem Pós-Cura	62,18	53,44	47,50	57,26
Provete 1C	Hatch Spacing 0,025 Fill Cure Depth 0,1 Posição Vertical Com Pós-Cura	62,05	42,60	45,80	28,60

. 5 – CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1- Conclusões

Neste capítulo são enumeradas as principais conclusões resultantes do trabalho experimental desenvolvido e apresentadas linhas de trabalhos futuros decorrentes do conhecimento adquirido. Após um extenso estudo sobre os processos de fabricação aditiva em geral e dos processos estereolitográficos em particular (Capítulo 2) foi realizado um estudo detalhado do processo de cura e da caracterização mecânica de estruturas poliméricas (Capítulo 3). Finalmente, procedeu-se um trabalho experimental onde se tentou perceber o efeito das condições de processamento (orientação do provete, posição na plataforma de trabalho, profundidade de penetração ou espessura de cada camada, espaçamento entre linhas de varrimento e realização de operações de pós-cura) e efeito da humidade sobre as propriedades termo-mecânicas de provetes estereolitográficos (Capítulo 4).

As principais conclusões resultantes deste trabalho de investigação são:

Em provetes construídos na posição horizontal, o aumento da distância de construção do provete ao centro da plataforma implica:

- Redução do módulo útil à temperatura ambiente para provetes produzidos com baixas profundidades de cura (0.1 mm).
- Aumento do módulo útil à temperatura ambiente para provetes produzidos com profundidades de cura médias (0.225 mm) e altas (0.5 mm).
- Redução do módulo perdido à temperatura de transição vítrea para provetes produzidos com profundidades de cura baixas (0.1 mm) ou médias (0.225 mm).

Em provetes construídos na posição vertical, o aumento da distância de construção do provete ao centro da plataforma implica:

- Aumento do módulo útil à temperatura ambiente.
- Em provetes submetidos à operação de pós-cura, o aumento da distância de construção conjugada com o aumento da profundidade de cura aumenta significativamente o valor do módulo perdido à temperatura ambiente. Para o mesmo aumento de distância de construção, aumentar a profundidade de cura de 0.1 mm para 0.225 mm implica que o aumento passe de 9% para 27%.
- Aumento do módulo perdido à temperatura de transição vítrea.

Quer em provetes construídos na posição horizontal, quer na posição vertical, o aumento da distância de construção do provete ao centro da plataforma implica:

- Aumento do valor do módulo perdido (E'') à temperatura ambiente.
- Em provetes submetidos à operação de pós-cura, o aumento da distância de construção conjugada com o aumento da profundidade de cura aumenta significativamente o valor do módulo perdido à temperatura ambiente. No caso do módulo perdido, para o mesmo aumento de distância de construção, aumentar a profundidade de cura de 0.1 mm para 0.225 mm implica que o aumento passe de 5% para 48% (construção na horizontal) e de 19% para 38% (construção na vertical).
- Não se verificam alterações significativas no valor do pico de $\tan \delta$.
- Provetes construídos na extremidade da plataforma e submetidos à operação de pós-cura apresentam menor valor de T_g .
- Provetes construídos na extremidade da plataforma e não submetidos à operação de pós-cura apresentam maior valor de T_g .

Em provetes construídos na posição horizontal, o aumento do espaçamento entre linhas de varrimento implica:

- Aumento médio do módulo útil (E') à temperatura ambiente para profundidades de cura baixas (0.1mm) ou médias (0.225mm). Este aumento é maior em termos percentuais em provetes submetidos à operação de pós-cura.
- Aumento médio do módulo perdido (E'') à temperatura ambiente. Este aumento é independente da profundidade de cura.

- Aumento do módulo perdido (E'') à temperatura de transição vítrea para profundidades de cura baixas (0.1 mm) ou médias (0.225 mm).

Em provetes construídos na posição vertical, o aumento do espaçamento entre linhas de varrimento implica:

- Redução do valor do módulo útil (E') e do módulo perdido (E'') à temperatura ambiente para profundidades de cura baixa (0.1 mm).
- Aumento do valor do módulo útil (E') e do módulo perdido (E'') à temperatura ambiente para profundidades de cura médias (0.225 mm) ou altas (0.5 mm).
- Redução do módulo perdido (E'') à temperatura de transição vítrea para profundidades de cura baixa (0.1 mm).
- Aumento do módulo perdido (E'') à temperatura de transição vítrea para profundidades de cura médias (0.225 mm) ou altas (0.5 mm).

Em provetes construídos quer na posição horizontal, quer na posição vertical, o aumento do espaçamento entre linhas de varrimento implica:

- Aumento de $\tan \delta$ à temperatura do pico de $\tan \delta$. Este aumento é independente da profundidade de cura (0.1, 0.225 ou 0.5 mm).
- Independentemente dos provetes serem submetidos a operações de pós-cura e das profundidades de cura utilizadas, o aumento da distância do espaçamento entre linhas de varrimento resulta numa diminuição da T_g . Este efeito é ligeiramente mais significativo em provetes construídos na posição horizontal.

Em provetes construídos na posição horizontal, com distancia de varrimento de 0.025 mm, profundidade de cura 0.1mm e com operação de pós-cura, quando submetidos a testes de humidade durante períodos curtos (6 horas) verificou-se que:

- O módulo útil à temperatura ambiente baixa nas 3 primeiras horas e volta aos valores iniciais nas segundas 3 horas.
- O módulo perdido à temperatura ambiente baixa cerca de 37% nas 3 primeiras horas e aumenta cerca de 15% nas segundas 3 horas.

- O módulo perdido não sofre alterações nas 3 primeiras horas, aumentando nas 3 horas seguintes.
- O valor de $\tan \delta$ à temperatura do pico de $\tan \delta$ diminui nas primeiras 3 horas e depois aumenta ligeiramente nas segundas 3 horas de exposição.
- T_g baixa drasticamente nas três primeiras horas de exposição sendo mínima a diminuição nas três horas seguintes.

Em provetes construídos na posição horizontal, com distância de varrimento de 0.025 mm, profundidade de cura 0.1mm e sem operação de pós-cura, quando submetidos a testes de humidade durante períodos longos (168 horas) verificou-se:

- O módulo útil à temperatura ambiente tem uma redução nas primeiras 24 horas e mantêm-se estável durante as segundas 24 horas. Em seguida quando submetido a 120 horas adicionais de exposição à humidade, sofre uma redução drástica de módulo perdendo todas as suas características de resistência à carga.
- O módulo perdido à temperatura ambiente aumenta nas primeiras 24 horas, mantendo-se estável nas 24 horas de exposição seguintes, baixando novamente quando exposto durante 168 horas.
- O módulo perdido à temperatura de transição vítrea diminui nas primeiras 24 horas de exposição, aumenta nas segundas 24 horas de exposição para os valores iniciais e em seguida baixa novamente até atingir as 168 horas de exposição à humidade.
- O valor de $\tan \delta$ à temperatura do pico de $\tan \delta$ diminui com a exposição à humidade.

Para provetes construídos na posição vertical, com distância de varrimento de 0.025 mm, profundidade de cura 0.1mm e com operação de pós-cura, quando submetidos a testes de humidade durante períodos longos (168 horas):

- O módulo útil à temperatura ambiente nas primeiras 48 horas de exposição diminui, mantendo-se estável para exposições à humidade de 168 horas.

- O módulo perdido à temperatura ambiente aumenta significativamente nas primeiras 24 horas, diminuído nas segundas 24 horas, para voltar a aumentar em seguida.
- O módulo perdido à temperatura de transição vítrea, diminui rapidamente nas primeiras 24 horas, diminui apenas ligeiramente nas 24 horas de exposição seguintes, para por fim aumentar.
- O valor do pico de $\tan \delta$ nas primeiras 24 horas diminui com o aumento do tempo de exposição à humidade

5.2- Trabalhos futuros

Desde o início que este trabalho tem como objectivo revelar mapas que caracterizem as diversas propriedades das resinas estereolitográficas bem como a influência dos parâmetros de construção. Este é um trabalho extenso que não se esgota com o presente estudo. Assim pretende-se desenvolver no futuro:

- Realização de novos testes com um número mais alargado de parâmetros para validação de algumas das conclusões obtidas
- Avaliação do efeito de novos parâmetros com a velocidade de varrimento
- Análise de foto-calorimetria diferencial de varrimento para correlacionar a variação das propriedades termo-mecânicas com a percentagem de material curado
- Análise por microscopia electrónica de varrimento da morfologia das estruturas obtidas, correlacionando-a com as propriedades termo-mecânicas obtidas
- Desenvolvimento de modelos fenomenológicas para simulação e optimização do processo de fabricação por estereolitografia

REFERÊNCIAS

- Alves, N.M., Bártolo, P.J., Integrated Tools for Virtual and Physical Automatic Construction, *Automation in Construction*, 15, 257-271, 2006
- Barros, M.L., Scarparo, M.A.F., Kiel, A., Gerck, E., Hurtak, J.J., Stereolithography with thermosensitive resins using CO₂ laser, *Journal of Applied Polymer Science*, 54, 1575-1578, 1994
- Bártolo, P.J., *Optical approaches to macroscopic and microscopic engineering*, Tese de Doutoramento, Universidade de Reading, Reino Unido, 2001
- Bártolo, P.J., Stereolithographic processes, em *Stereolithographic processes: materials, processes and applications*, Editado por P.J. Bártolo, Springer (no prelo)
- Bártolo, P.J., Gaspar, J., Metal filled resin for stereolithography metal part, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 57, 235-238, 2008
- Bártolo, P.J., Gibson, I., Hystory of stereolithographic processes, em *Stereolithgraphic processes: materials, processes and applications*, Editado por P.J. Bártolo, Springer (no prelo)
- Bártolo, P.J., Mateus, A., O estado da arte dos processos aditivos de prototipagem rápida, *O Molde*, Junho, 39-46, 2002^a
- Bártolo, P.J., Mateus, A., O estado da arte dos processos aditivos de prototipagem rápida: processos estereolitográficos, *O Molde*, Setembro, 24-28, 2002^b
- Bártolo, P.J., Mateus, A., O estado da arte dos processos aditivos de prototipagem rápida: mecanismos de cura em processos estereolitográficos, *O Molde*, Março, 24-27, 2003
- Bártolo, P.J., Mitchell, G., Stereo-thermal-lithography: a new principle for rapid prototyping, *Rapid Prototyping Journal*, 9, 150-156, 2003

- Bertsch, A., Jiguet, S., Renaud, P., Microfabrication of ceramic components by microstereolithography, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 14, 197-203, 2004
- Cassu, S.N., Felisberti, M.I., Comportamento dinâmico-mecânico e relaxações em polímeros e blendas poliméricas, *Química Nova*, 28, 255-263, 2005
- Choi, S., Kwok, K, A tolerant slicing algorithm for layered manufacturing, *Rapid Prototyping Journal*, 8, 161-179, 2002.
- CIMJECT, http://www.cimject.ufsc.br/knowledge/02_knowledge_RP.htm, acessado a 13 de Fevereiro de 2008
- Custompart.Net, Stereolithography, <http://www.custompartnet.com/wu/stereolithography>, acessado em 5 de Outubro de 2009
- Ehrenstein, G.W., Riedel, G., Trawiel, P., *Thermal analysis of plastics: theory and practice*, Hanser Verlag, 2004
- Fabbers, *The STL format*; <http://www.ennex.com/~fabbers/StL.asp> acessado a 13 de Fevereiro de 2008.
- Fouassier, J.P., *Photoinitiation, photopolymerization, and photocuring: fundamentals and applications*, Hanser, New York, 1995.
- Fudim, E.V., *Method and apparatus for production of three-dimensional objects by photosolidification*, Patente Norte Americana 4801477, 1989
- Fudim, E.V., *Method and apparatus for production of three-dimensional objects by photosolidification*, Patente Norte Americana 4752498, 1988
- Fuh, J.Y.H., Choo, Y.S., Nee, A.Y.C., Lu, L., Lee, K.C., Improvement of the UV curing process for the laser lithography technique, *Materials & Design*, 16, 23-33, 1995

- Gaspar, J., Bártolo, P.J., Duarte, F.M., Cure and rheological analysis of reinforced resins for stereolithography, *Materials Science Forum*, 587-588, 563-567, 2008
- Gibson, I., Rosen, D.W., Stucker, B., *Additive manufacturing technologies: rapid prototyping to direct digital manufacturing*, Springer, 2009
- Gilbert A., Baggot, J., *Essentials of molecular photochemistry*, Blackel Science Publishers, London, 1991
- Gillham, J.K., Award address formation and properties of network polymeric materials, *Polymer Engineering and Science*, 19, 676-682, 1979
- Gillham, J.K., Characterization of thermosetting materials by torsional braid analysis, *Polymer Engineering and Science*, 1976, **16**, 353.
- Guillet, J., *Polymer photophysics and photochemistry*, Cambridge University Press, Cambridge, 1985.
- Hindson, G.A., Kochhar, A.K., Cook, P., Procedures for effective implementation of simultaneous engineering in small to medium enterprises, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 212, 251-258, 1998
- Hope, R., Roth, R., Jacobs, P., Adaptative slicing with sloping layer surfaces, *Rapid Prototyping Journal*, 3, 89-98, 1997.
- Hull, C.W., Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography, Patente Norte Americana 4575330, 1986
- Jardini, A.L., Filho, R.M., Infrared stereolithography, em *Stereolithgraphic processes: materials, processes and applications*, Editado por P.J. Bártolo, Springer (no prelo)
- Jardini, AL., Filho, R.M., Scarparo, M.A.F., Andrade, S.R., Moura, L.F.M., Infrared laser stereolithography: prototype construction using special combination of compounds and laser parameters in localised curing process, *International Journal of Materials and Product Technology*, 21, 241-254, 2004

- Jardini, A.L.M., Maciel, R.F., Scarparo, M.A.F., Andrade, S.R., Moura, L.F.M
Advances in stereolithography: a new experimental technique in the production of a three-dimensional plastic model with an infrared laser, *Journal of Applied Polymer Science*, 92, 2387-2394, 2004
- Jardini, A.L., Maciel, R. Scarparo, M.A., Andrade, S.R., Moura, L.F., The development in infrared stereolithography using thermosensitive polymers, *Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping, Proceedings of the 1st International Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, Edited by P.J. Bártolo et al, Polytechnic Institute of Leiria, 2003
- Jones, P.J., *CAD/CAM: features, applications and management*, McMillan Press, 1992
- Kai, C.C., Fai, L.K., *Rapid prototyping and manufacturing: the essential link between design and manufacturing*, em *Integrated Product and Process Development – Methods, Tools, and Thechnologies*, Editado por J.M. Usher et al, Wiley, 1998.
- Kai, C.C., Fai, L.K., Sing, L.C., *Rapid prototyping – principles and applications*, World Scientific Publishing, 2003
- Kruth, J.P., Leu, M.C., Nakagawa, T., Progress in additive manufacturing and rapid prototyping, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 47(2), 525-540, 1998
- Lee, K., *Principles of CAD/CAM/CAE systems*, Addison-Wesley, 1999
- Levy, G.N., Digital layer manufacturing chances and challenges, *Proceedings of the 9th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, 2008
- Levy, G.N., Schindel, R., Kruth, J.P., Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, 52(2), 589-609, 2003
- McCrum, N.G., Buckley, C.P., Bucknall, C.B., *Principles of polymer engineering*, Oxord Science Publications, 1997

- Menard, K.P., *Thermomechanical and dynamic mechanical analysis*, em Handbook of Plastic Analysis, Editado por H. Lobo e J.V. Bonilla, Marcel Dekker, 2003
- Molcho, G., Schneor, R., Zipori, Y., Kowalsi, P., Denkena, B., Shiptalni, M., Computer aided manufacturability analysis closing the CAD-CAM knowledge GAP, *Proceedings of the 9th Biennial ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, 2008
- Núñez, L., Fraga, F., Núñez, M. R., Villanueva, M., Effects of Diffusion on the Kinetic Study and TTT Cure Diagram for an Epoxy/Diamine System, *Journal of Applied Polymer Science*, 70, 1931-1938, 1998.
- Núñez, L., Fraga, F., Castro, A., Núñez, M. R., Villanueva, M., TTT cure diagram for an epoxy system diglycidyl ether of bisphenol A/1,2 diamine cyclohexane/calcium carbonate filler, *Polymer*, 42, 3581-3587, 2001.
- Olayan, H.B., Hamid, H.S., Owen, E.D., Photochemical and thermal crosslinking of polymers, *J.M.S.-Rev. Macromol. Chem. Phys.*, C36(4), 671-719, 1996
- Perkin Elmer, *Dynamic Mechanic Analysis, Basics: Part 1 How DMA works*; http://las.perkinelmer.com/content/applicationnotes/app_thermaldynmechanalybasicspart1.pdf, acedido em 17 de Julho de 2009.
- Pomerantz, I., Cohen-Sabban, J., Bieber, A., Kamir, J., Katz, M., Nagler, M., *Three dimensional modelling apparatus*, Patente Norte Americana 4961154, 1990
- Pomerantz, I., Gilad, S., Dollberg, Y., Ben-Ezra, B., Sheinman, Y., Barequet, G., Katz, M., *Three dimensional modelling apparatus*, Patente Norte Americana 5519816, 1996
- Prime, R.B., Thermosets in *Thermal characterization of polymeric materials*, Vol. 2, Edited by A. Turi, Academic Press, London, 1997.
- Noorani, R., Rapid Prototyping – *Principles and Applications*, Wiley, 2006

Rapid Manufacturing Platform, *Strategic Agenda*, Bruxelas, 2006

RPDRC: Rapid Product Development Center,
http://rpdrc.ic.polyu.edu.hk/content/rapid_prototyping_proc.htm, acessado a 13 de Fevereiro de 2008

Rypl, D., Bittnar, Z., Triangulation of 3D surfaces described by stereolithography files, Technical Report, Universidade Técnica de Praga, República Checa, 2008

Sabourin, E., Houser, S., Bohn, J., Accurate exterior, fast interior layered manufacturing, *Rapid Prototyping Journal*, 3, 44-52, 1997.

Scarparo, M.A.F., Kiel, A., Zhiyao, Z., Ferrari, C.A., Chen, Q.J., Miller, J.H., Allen, S.D., Study of resin based materials using CO2 laser stereolithography, *Polymer*, 38, 2175-2181, 1997

Selli, E., Bellobono, I.R., Photopolymerization of multifunctional monomers: kinetic aspects, in *Radiation curing in polymer science and technology*, Vol. III: *Polymerisation mechanisms*, Edited by J. P. Fouassier and J. F. Rabek, Elsevier Science Publishers, London, 1993.

Sepe, M., *Dynamic Mechanical Analysis for Plastic Engineering*, Plastic Design Library, 1998.

Silva, J.V.L., Planejamento de processo para prototipagem rápida, em *Prototipagem Rápida – Tecnologias e Aplicações*, Editado por N. Volpato, Blucher, 2007

Tata, K., Fadel, G., Bagchi, A., Aziz, N., Efficient slicing for layered manufacturing, *Rapid Prototyping Journal*, 4, 151-167, 1998.

Veltec; TRITON - Thermal analyzer DMA TRITEC 2000;

<http://www.analis.be/products/product.asp?prod=2177>; acessado a 17 de Março de 2010.

- Venuvinod, P.K., Ma, W., *Rapid Prototyping – Laser-based and other technologies*, Kluwer, 2004
- Ulrich, K., Eppinger, S., *Product design and development*, McGraw-Hill, 2007
- Wetton, R.E., *Thermomechanical methods*, em *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry*, Vol.1, Principles and Practice, Editado por M.E. Brown, 1998
- Wohlers, T., *Wohlers Report 2010 – State of the industry – Annual Worldwide Progress Report*, Wohlers Associates, USA, 2010
- Zhang, X., Jiang, X.N., Sun, C., Micro-stereolithography of polymeric and ceramic microstructures, *Sensors and Actuators*, 77, 149-156, 1999